



Janne Holopainen

**Matkustaja-autolautojen vuotovakavuustarkastelu uusia
turvallisuussääntöjä noudattaen**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 22.09.2017

Valvoja: Professori Pentti Kujala

Ohjaaja: Harri Suistio, Diplomi-insinööri

Tiivistelmä

Tekijä Janne Holopainen

Työn nimi Matkustaja-autolauttojen vuotovakavuustarkastelu uusia turvallisuussääntöjä noudattaen

Koulutusohjelma Konetekniikka

Pääaine Meritekniikka

Koodi K3005

Työn valvoja Professori Pentti Kujala

Työn ohjaaja Diplomi-insinööri Harri Suistio

Päivämäärä 22.09.2017 Sivumäärä 70

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO käynnisti prosessin vuotovakavuussäännön kehittämiseksi sillä Euroopan meriturvallisuusviranomaisen EMSA:n vuonna 2008 teettämässä tutkimuksessa oli havaittu vakavia turvallisuuspuutteita voimaan tulevassa Solas 2009 vuotovakavuussäännössä. Tämän jälkeen matkustaja-autolauttojen vuotovakavuutta on tutkittu laajasti ja vuotovakavuussäännön muuttamiseksi on esitetty useita eri vaihtoehtoja.

Näistä ehdotuksista ei kuitenkaan päästy yksimielisyyteen, joten IMO:n SDC-alakomitean työryhmä laati kompromissiehdotuksen R- ja A-indeksien muuttamiseksi. IMO:n jäsenvaltiot pystyivät hyväksymään Solas 2020:nä tunnetun sääntömuutoksen. Muutos kohottaisi merkittävästi alusten turvallisuustasoa vuotoon johtavassa yhteentörmäystilanteessa. Toisaalta aluksen suunnittelusta ja rakentamisesta tulisi aikaisempaa haastavampaa, mikä taas kasvattaisi kustannustasoa.

Tässä työssä tarkastellaan tapaustutkimuksena sääntömuutoksen vaikutusta nykyaikaisen, Itämerellä operoivan matkustaja-autolautan vesitiiviin osastoinnin suunnitteluun. Työn tarkoituksena on selvittää, onko meriturvallisuuskomitean hyväksymä sääntömuutos riittävän vaativa, jotta sillä voidaan korvata matkustaja-autolautoille nykyisin voimassa oleva Tukholman sopimus, direktiivi 2003/25/EC, jolla käsitellään alustyypille ominainen, vettä kannella –tilanne.

Tutkimusten tuloksena havaittiin, että Tukholman sopimus on edelleen määräävin vuotovakavuussääntö, joka tulee asettamaan rajoitukset matkustaja-autolautan vesitiiviin osastoinnin suunnittelulle.

Avainsanat Vuotovakavuus, Solas 2020, Matkustaja-autolautta, RoPax

Abstract

Author Janne Holopainen

Title of thesis Damage stability study of passenger ferries with new safety regulations

Degree programme Mechanical Engineering

Major Naval Architecture

Code K3005

Thesis supervisor Professor Pentti Kujala

Thesis advisor Harri Suistio, M.Sc. (Tech)

Date 22.09.2017

Number of pages 70

Language Finnish

Abstract

International Maritime Organization (IMO) started a development process with its damage stability regulations. Research study in year 2008 tendered by European Maritime Safety Agency EMSA found significant defects in Solas 2009 damage stability rules. Since then damage stability of passenger ferries has been widely studied and variety of proposals on how the damage stability rule should be updated have been given.

Because none of the proposals were unanimously accepted by IMO member states, SDC sub-committee's working group drafted a compromise proposal for updated R- and A-indices. This SDC proposal, which is known as Solas 2020, is widely accepted between IMO member states. This update to damage stability regulation would significantly increase the safety level of passenger ships in collision accidents. On the other hand, design and building of new vessels can be more challenging than before, which will affect cost level.

Effect of the updated damage stability regulation to design requirements of the watertight compartmentation of modern Baltic ro-ro-passenger ferry is studied in this thesis. Goal of this study is to find out if safety level this updated damage stability rule high enough that current Stockholm Agreement, directive 2003/25/EC, which takes into account ferry specific 'Water-on-Deck' situation, can be withdrawn.

As a result it was found that Stockholm Agreement is still the most governing damage stability rule, which will set requirements for design of watertight compartmentation of ro-ro passenger ferries.

Keywords Damage stability, Solas 2020, ro-ro passenger ferry, RoPax

Alkusanat

Aiheena laivojen turvallisuus yhteentörmäystilanteessa on mielenkiintoinen ja tärkeä aihe, jota suomenkielisessä kirjallisuudessa on käsitelty viime vuosina varsin vähäisesti. Aihe kiinnostaa allekirjoittanutta ja tämä diplomityö tarjosi hienon mahdollisuuden perehtyä syvällisesti aiheeseen, siihen liittyvään sääntelyyn, tulossa oleviin uudistuksiin sekä sääntelyn taustalla vaikuttaan tieteelliseen tutkimustyöhön. Tämä diplomityö on tehty työsuhteessa Rauma Marine Constructions Oy:lle (Rauman telakka). Työn valvojana toimi professori Pentti Kujala Aalto yliopiston teknillisestä korkeakoulusta ja ohjaajana diplomi-insinööri Harri Suistio Rauma Marine Constructions Oy:stä.

Haluan kiittää Rauma Marine Constructions Oy:tä kaikista työn toteuttamiseksi tarvittujen materiaalien, ohjelmistojen ja tilojen tarjoamisesta. Lisäksi työskentely Rauman telakalla on ollut hieno tilaisuus kehittää osaamistani laivasuunnittelutehtävissä. Kiitän telakan suunnittelujohtaja DI Jukka Vasamaa asiantuntevista näkemyksistä ja opastuksesta diplomityöhön ja laivateoriaan liittyvissä kysymyksissä. Kiitoksensa ovat ansainneet työn valvoja ja ohjaaja, herrat Kujala ja Suistio, antaessaan hyviä näkökulmia ja vinkkejä työn käytännön toteuttamiseen. Kiitän työtovereita Timo Ahokasta ja Tuula Ojalaa NAPA-ohjelmiston käyttöön liittyvässä opastuksesta ja vinkeistä.

Rauma 5.9.2017

Janne Holopainen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Merkinnät ja lyhenteet

1. Johdanto
 - 1.1. Matkustaja-autolautta
 - 1.2. Sääntömuutoksen tausta
 - 1.3. Tutkimusongelma
 - 1.4. Työn tavoitteet
 - 1.5. Työn rajaukset
2. Vaurioituneen aluksen stabiliteetti
 - 2.1. Pienet kallistuskulmat ja alkuvaihtokeskuskorkeus
 - 2.2. Suuri kallistuma oikaiseva momenttivarsi
 - 2.3. Lisääntynyt paino tai menetetty uppouma
 - 2.4. Vapaiden nestepintojen vaikutus
 - 2.5. Tuulen ja aallokon aiheuttama momentti
 - 2.6. Vettä autokannella
3. IMO, SOLAS ja nykyinen sääntely
 - 3.1. IMO
 - 3.2. SOLAS
 - 3.3. SOLAS 1990
 - 3.4. 2003/25/EC eli Tukholman sopimus
 - 3.5. SOLAS 2009
4. Kohti turvallisempia matkustaja-autolauttoja
 - 4.1. SOLAS 2009 - Heikkouksia löytyy
 - 4.2. Ratkaisuja aluksen vuotovakavuuden kasvattamiseksi
 - 4.3. Turvallisuus- ja riskianalyysi FSA
 - 4.4. Tavoitteeksi suuronnettomuus enintään sadan vuoden välein
 - 4.5. Esitetyt vaihtoehdot R- ja A-indeksille
 - 4.6. SOLAS 2020 - Kompromissiratkaisu?
5. Tapaustutkimus
 - 5.1. Tutkittavan aluksen esittely
 - 5.2. NAPA-malli
 - 5.3. Lastitilanteet
 - 5.4. Vaurioalueet
 - 5.5. Kriteerit
 - 5.6. Matkustajamäärä ja R-indeksi
 - 5.7. Tutkimusmenetelmä

6. Tulokset ja analyysi
 - 6.1. Tapaus 1: N=2000, ei pitkää alalastiruumaa
 - 6.2. Tapaus 2: N=800, ei pitkää alalastiruumaa
 - 6.3. Tapaus 3: N=800, pitkä alalastiruumaa
 - 6.4. Tapausten välinen vertailu
 - 6.5. Herkkyysanalyysi
 7. Pohdintaa
 8. Johtopäätökset
 9. Jälkisanat
 10. Lähteluettelo
- Liiteluettelo
- Liite 1 NAPA-malli 5 sivua
- Liite 2 Lähtöarvot 4 sivua
- Liite 3 Tulokset 4 sivua

Merkinnät ja lyhenteet

B	[m]	Mallileveys
GM	[m]	Vapaalla nestepinnalla korjattu alkuvaihtokeskuskorkeus
GM0	[m]	Alkuvaihtokeskuskorkeus
GZ	[m]	Oikaiseva momenttivarsi
GZmax	[m]	Oikaisevan momenttivarren suurin arvo
Loa	[m]	Suurin pituus
Lpp	[m]	Luotiviivapituus
Ls	[m]	Osastointipituus
N _{max}	[-]	Suurin sallittu henkilömäärä aluksella
Range	[aste]	Positiivinen vakavuuslaajuus
Rangemax	[aste]	Positiivisen vakavuuslaajuuden tavoitearvo
T	[m]	Suunnittelusyväys
Δ	[tonni]	Uppouman nostovoima
φ	[aste/rad]	Kallistuskulma
θ	[aste/rad]	Kallistuskulma
ρ	[kg/m ³]	Tiheys
∇	[m ³]	Uppouman tilavuus

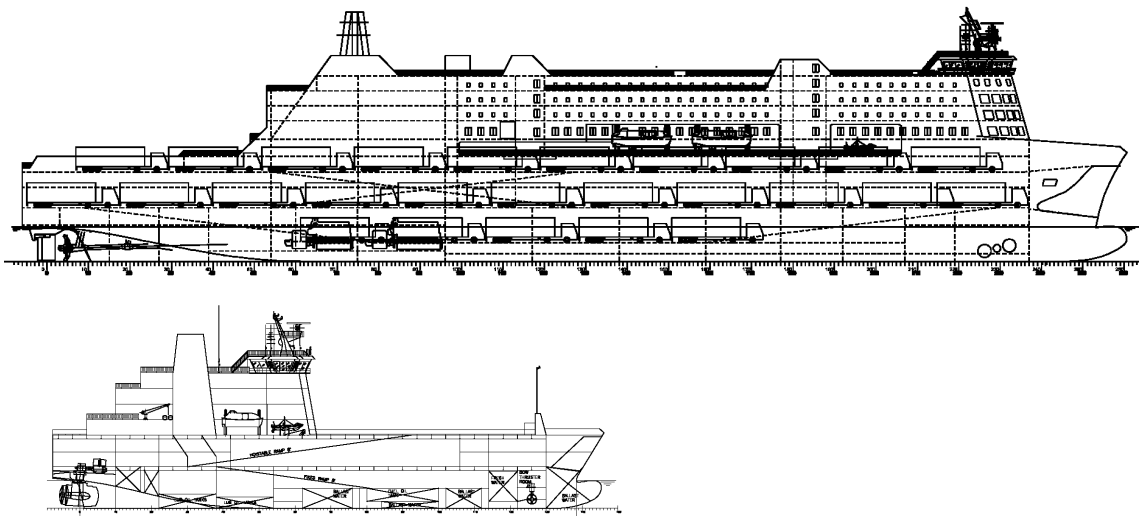
ALARP	As low as reasonably practicable
EMSA	European maritime safety agency
FSA	Formal Safety Assessment
GOALDS	Goal-based Damage Stability
ICLL	International Convention on Load Lines
IMO	International Maritime Organization
IS 2008	Intact Stability Code, 2008
LLH	Long Lower Hold
LNG	Liquefied Natural Gas
MSC	Maritime Safety Committee
RoPax	Ro-Ro-matkustaja-alus, matkustaja-autolautta
SA	Stockholm Agreement
SDC	Sub-committee on ship design and construction
SLF	Sub-committee on stability, loadlines and fishing vessel safety
SOLAS	The International Convention for Safety of Life at Sea
SRtP	Safe Return to Port

1 Johdanto

1.1 Matkustaja-autolautta

Matkustaja-autolautta eli RoPax-alus (engl. roll-on roll-off passenger ship) on alustyyppi, joka kuljettaa pyörillä kulkevaa lastia, kuten esimerkiksi henkilöautoja tai kuorma-autoja, sekä matkustajia. Aluksen tunnuspiirteenä on yksi tai useampi avara autokansi sekä lisäksi matkustajille varattu majoitus ja/tai ravintolakansi. Autokannet lastataan yleensä suurten perä- tai keularamppien kautta. Alustyyppin etuna on nopea ja helppo lastaaminen ja purkaminen. Satamassa ei tarvita nostureita, vaan lastinkäsittelyä varten riittää ramppi, mitä pitkin ajoneuvot pääsevät siirtymään alukseen/aluksesta pois.

Matkustaja-autolautat muodostavat varsin monipuolisen alusjoukon, jossa alukselle suunniteltu kuljetustehtävä vaikuttaa voimakkaasti aluksen ulkonäköön ja kokoon. Itämeren alueella operoivien alusten kokonaispituus (loa) vaihtelee 69 metristä aina 241 metriin. Alusten matkustajakapasiteetti taas vaihtelee 67:n ja 2852:n välillä. Pääasiassa lastia kuljettavissa aluksissa pyritään maksimoimaan lastinkuljetuskapasiteetti, jota kaistametreinä mitattuna on tyypillisesti tällaisessa aluksessa 2000 metriä tai enemmän. Esimerkkinä näistä ovat Suomen ja Saksan sekä Suomen ja Viron välillä liikennöivät nopeat matkustaja-autolautat. Kuvassa 1 on esitetty esimerkkinä kaksi erilaista matkustaja-autolauttaa.



Kuva 1. Erilaisia matkustaja-autolauttoja. [1]

Mikäli matkustaja-autolautan suunnittelun painotus on matkustajakapasiteetissa, muistuttaa alus enemmän risteilyalusta. Tällöin alukselta löytyy paljon matkustajien käyttöön varattuja hyttejä sekä ravintola- ja viihdealueita, jossa matkustajat voivat viettää aikaa. Kaistametrejä näissä aluksissa on vähemmän, Itämerellä liikennöivissä aluksissa tyypillisesti noin 1000 metriä. Esimerkkinä näistä ovat Suomen ja Ruotsin välillä liikennöivät matkustaja-autolautat.

Lisäksi osa suuremmista saaristoliikenteen losseista luokitellaan matkustaja-autolautoiksi. Osa suurnopeusaluksista kykenee kuljettamaan henkilöautoja, jolloin myös ne lasketaan matkustaja-autolautoiksi.

1.2 Sääntömuutoksen tausta

Kansainvälisen merenkulkujärjestön (IMO, International Maritime Organization) yleissopimus ihmishengen turvallisuudesta merellä (SOLAS, Safety of Life at Sea) määrittää pienimmät turvallisuusvaatimukset, jotka kaupallisessa liikenteessä toimivien alusten tulee täyttää. Yleissopimusta ylläpidetään ja kehitetään IMO:n toimesta. Nykyisellään Solas yleissopimus koostuu kahdestatoista kappaleesta, jotka keskittyvät meriliikenteen turvallisuuden eri osa-alueisiin.

Edellinen suuri muutos Solas vuotovakavuussääntöihin tuli voimaan vuonna 2009, jolloin myös matkustaja-aluksille otettiin käyttöön probabilistinen laskentatapa. Turvallisuustaso määräytyy R-indeksin mukaan, joka lasketaan aluksen osastointipituuden ja matkustajamäärän perusteella. Aluksen vesitiiviille osastoinnille lasketaan A-indeksi ja turvallisuuden katsotaan olevan riittävä, mikäli A-indeksi on suurempi kuin R-indeksi. Tämän lisäksi aluksen tulee 90...100% todennäköisyydellä selviytyä pienistä vaurioista. Pienen vaurion laajuus ja vaadittava selviytymisen todennäköisyys määräytyvät matkustajamäärän perusteella. Tämän säännön tarkoituksena on varmistaa, ettei pieni vahinko aiheuta suurta vaaraa.

Solas 2009 säännön lisäksi Euroopan Unionin satamiin säännöllisesti liikennöivien matkustaja-autolauttojen tulee täyttää Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2003/25/EC, muutettuna, joka tunnetaan nimellä Tukholman sopimus (Stockholm Agreement, SA). Direktiivi edellyttää aluksen täyttävän edellisen Solas 1990 -vuotovakavuussäännön. Lisäksi aluksen vakavuuden tulee vuototilanteessa olla riittävä, vaikka autokannelle kertyisi vettä. Tukholman sopimuksen vettä kannella -hypoteesi on aluksen vesitiiviin osastoinnin suunnittelun kannalta varsin vaativa ja johtaa yleensä suoraan, tai varsin pienin muutoksin myös Solas 2009 säännön täyttymiseen.

Vuoden 2009 Solas säännön turvallisuustasoa on tutkittu useissa eri tutkimusprojekteissa ja havaintona on ollut, että nykyisen säännön pohjalta on mahdollista suunnitella alus myös siten, että se ei selviydy tietyistä vuototilanteista, vaan kaatuu ja uppoaa nopeasti jopa tyynessä vedessä. Tutkimuksissa on selvitetty aluksen vesitiiviiseen osastointiin ja päämittoihin tehtyjen muutosten vaikutusta A-indeksiin ja aluksen elinkaaren aikaisiin kustannuksiin. Muutosten kustannustehokkuutta on tutkimuksissa arvioitu vertaamalla muutoksella potentiaalisesti vältettyjä hengenmenetyksiä muutoksen aiheuttamiin kustannuksiin.

Tutkimusprojektit ehdottivat tulostensa pohjalta uusia laskentatapoja R- ja A-indekseille. Tavoitteena on nostaa matkustaja-alusten turvallisuustasoa siten, että tuhat henkeä vaativa onnettomuus tapahtuu laskennallisesti enintään kerran sadassa vuodessa. Nykyisellä turvallisuustasolla tällainen onnettomuus tapahtuu laskennallisesti kerran 20 vuodessa ja onnettomuuksista ja läheltä piti -tilanteista kerättyjen tilastojen valossa laskettu riskitaso vaikuttaisi pitävän paikkansa. Turvallisuustason nostaminen olisi täten perusteltua, mikäli se on kustannustehokkaasti saavutettavissa.

IMO:n meriturvallisuuskomitea (MSC, Maritime Safety Committee) on 96:ssa kokouksessaan hyväksynyt työryhmiensä tekemän esityksen Solas kappaleen II-1 vuotovakavuussääntöjen muuttamiseksi. Tämä uusi versio, SOLAS 2020, tulee todennäköisesti hyväksytyksi MSC:n 98:nnessä kokouksessa kesällä 2017 ja se tulee koskemaan 1.1.2020 jälkeen rakennettuja aluksia.

1.3 Tutkimusongelma

EMSA- ja GOALDS-tutkimusprojekteissa selvitettiin tapaustutkimuksena yhteensä 15 erilaisella matkustaja-aluksella erilaisten rakenteellisten ratkaisujen vaikutusta aluksella saavutettavaan A-indeksiin. Näiden ratkaisujen kustannustehokkuus arvioitiin IMO:n kriteerein ja tulosten pohjalta luotiin muutosehdotus vuotovakavuussäännön R-indeksiin. Lisäksi muutama IMO:n jäsenvaltio ja telakkateollisuuden toimija lähettivät arvioitavaksi omia tutkimuksiaan ja ehdotuksiaan.

Toteutettavasta sääntömuutoksesta päätettäessä IMO:n jäsenvaltiot eivät päässeet yksimielisyyteen, joten meriturvallisuuksikomitean alusten vakavuuteen erikoistunut SDC alakomitea laati kompromissiehdotuksen sääntömuutokseksi, jonka jäsenvaltiot pystyivät hyväksymään. Sääntömuutos parantaisi merkittävästi alusten selviytymiskykyä vuotoon johtavassa onnettomuustilanteessa. Sääntömuutoksesta jäi kuitenkin epäselväksi se, että nostaako se matkustaja-autolauttojen turvallisuustason riittävän korkealle, jotta Tukholman sopimuksesta voitaisiin jatkossa luopua.

1.4 Työn tavoitteet

Työn kirjallisuustutkimuksen tavoitteena on selvittää matkustaja-autolautan vuotovakavuuden fysikaalinen tausta. Lisäksi selvitetään, miten vuotovakavuussääntöjä on kehitetty 90-luvulta nykypäivään, mikä on vuotovakavuussääntelyn nykytilanne ja mikä on ehdotettujen muutosten tausta ja tavoite. Työssä perehdytään myös muiden tutkimusprojektien yhteydessä esille tulleisiin ratkaisuihin, joilla aluksen selviytymiskykyä vuototilanteessa pystytään parantamaan.

Työn kokeellisen osuuden tavoitteena on tapaustutkimuksena selvittää, selviytyykö sääntöehdotuksen mukaisesti suunniteltu nykyaikainen matkustaja-autolautta myös Tukholman sopimuksen edellyttämistä vauriotilanteista. Lisäksi tutkitaan LLH-alalastiruuman vaikutus vuotovakavuuteen sekä henkilömäärän vaikutusta sääntöjen asettamiin vaatimuksiin.

1.5 Työn rajaukset

Alusten vuotovakavuus on laaja-alainen aihe, johon liittyviä ilmiöitä ovat mm. aluksen rakenteiden vaurioituminen yhteentörmäyksen tai merenpohjaan osumisen seurauksena ja meriveden virtaaminen syntyneestä vuotoaukosta sisään. Lisäksi kun huomioidaan myös aallokon, tuulen, matkustajien ja lastin sekä vaurioituneen aluksen sisällä virtaavan veden vaikutus aluksen kellumisasentoon ja vakavuuteen, päästään hyvin todellisuutta kuvaavaan malliin aluksen selviytymisestä vaurioitumisen jälkeen. Edellä mainitut ilmiöt on sisällytetty sekä voimassaolevaan että ehdotettuun vuotovakavuussääntelyyn erilaisten kriteerien muodossa, joten työssä tehtävää tarkastelua rajataan seuraavasti:

Tarkastelu rajataan SOLAS kappaleen II-1 osan B1 vuotovakavuussääntöjen mukaiseen tarkasteluun MSC 96:ssa hyväksytyin muutoksin. Tämän lisäksi tarkastellaan Tukholman sopimuksen mukaisesti vettä kannella tilanteet. Osaan B1 kuuluva sääntö 8.1, joka viittaa SRtP-vaatimukseen, rajataan tarkastelun ulkopuolelle.

Dynaamiset ilmiöt, niiltä osin kuin niitä ei ole sääntöihin sisällytettynä, jätetään huomioimatta. Näitä ovat esimerkiksi veden sisääntunkeutumisen analysointi aika-tasossa tai aallokon aiheuttama aluksen keinunta. Nämä on huomioitu säännöissä asetetuilla

kriteereillä. Sen sijaan esimerkiksi järjestelyt vuodon tasaamiseksi kallistumisen vähentämiseksi tarkastellaan tarvittaessa erikseen.

Matkustaja-alusten suunnittelussa huomioon otettavia, vakavuuteen kantaa ottavia sääntöjä ovat lisäksi kansainvälinen lastiviivayleissopimus ICLL 66/68 (International Convention on Load Lines) ja ehjän laivan vakavuussäännöt IS 2008 (Intact Stability Code 2008). Näiden asianomainen tarkasteleminen rajataan tutkimuksen ulkopuolelle. Tapaustutkimuksessa käytettävä konseptialus suunnitellaan siten, että se täyttää edellä mainitut sopimukset ja säännöt.

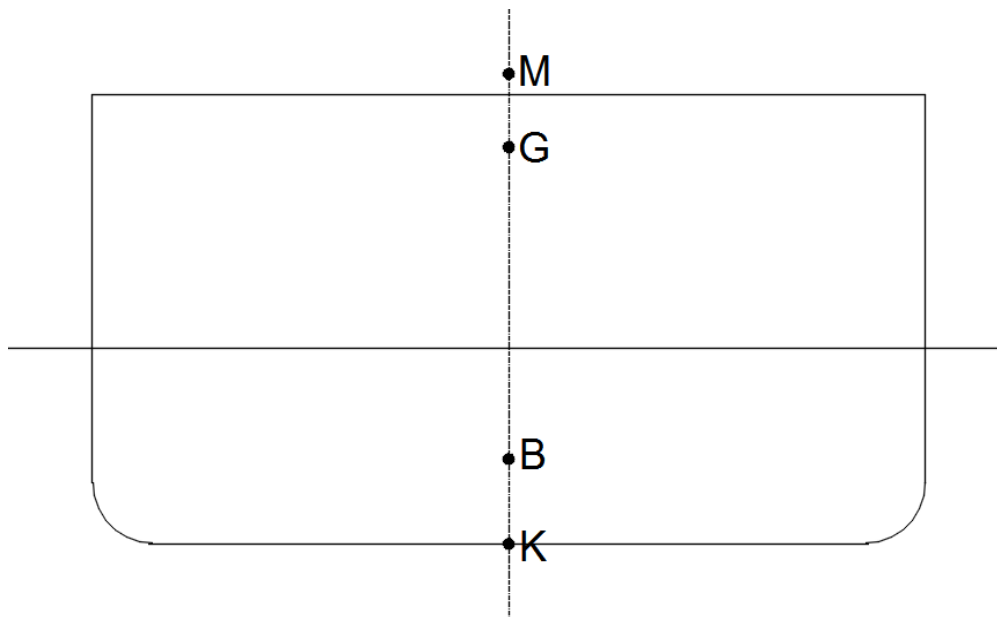
2 Vaurioituneen aluksen stabiilitetti

Stabiilitetti eli vakavuus kuvaa aluksen kykyä vastustaa kallistusta ja palautua takaisin tasapainotilaan kallistuksen aiheuttaneen häiriön poistuttua. Vaurioituneella aluksella vakavuus on yleensä merkittävästi heikentynyt. Tämä huomioidaan suunnitteluvaiheessa varaamalla alukseen riittävästi vakavuusreserviä, jotta alus selviytyy myös vaurioituneena merenkäynnin, tuulen ja pelastustoimien aiheuttamista kallistavista momenteista. Tässä luvussa esitetään aluksen vakavuuteen vaikuttavia tekijöitä sekä esitellään yleisesti käytössä olevaa käsitteistöä, jolla kuvataan aluksen alkuvakavuutta ja vuotovakavuutta.

2.1 Pienet kallistuskulmat ja alkuvaihtokeskuskorkeus

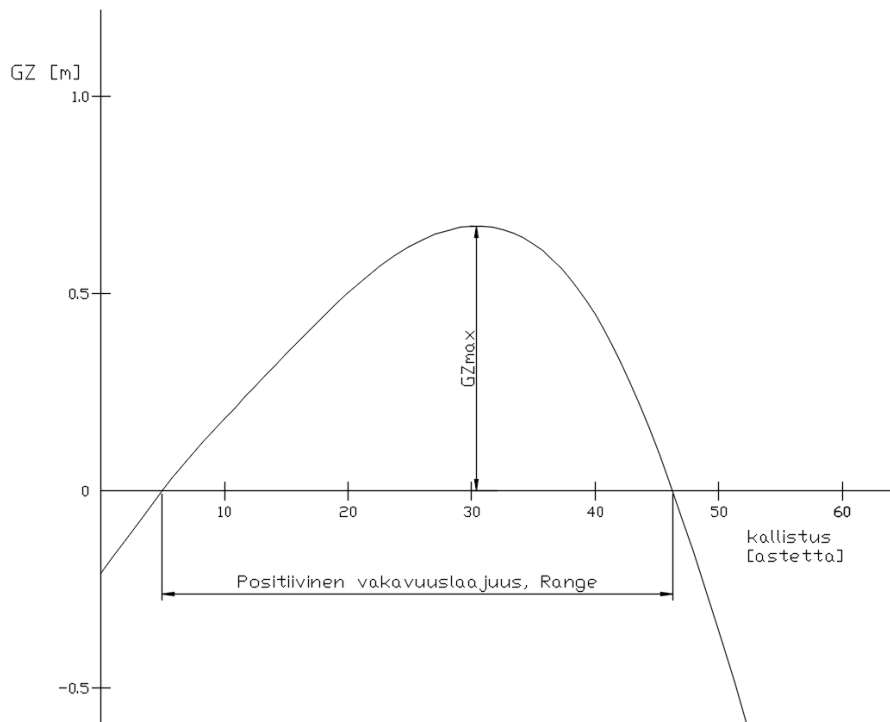
Aluksen pieniä kallistuskulmia käsiteltäessä käytetään oletuksena, että alus on kyljet ovat pystysuoria ja että kallistuskulma on niin pieni, että aluksen vesiviivapinnan voidaan katsoa pysyvän muuttumattomana. Kirjallisuuslähteestä riippuen kallistuskulmat voidaan käsitellä pieninä, kun kallistuskulma on alle 5-15 astetta. Tällöin aluksen oikaiseva momentti käyttäytyy lineaarisesti kallistuskulman funktiona. Näillä oletuksilla aluksen voidaan laskea alkuvaihtokeskuskorkeus GM_0 , joka kuvaa ehjän aluksen kykyä palautua takaisin tasapainotilaan, kun poikkeaman aiheuttanut häiriö poistetaan. Alus on vakaa, jos vaihtokeskuskorkeus on positiivinen, eli vaihtokeskus sijaitsee painopisteen yläpuolella. Negatiivinen vaihtokeskuskorkeus puolestaan tarkoittaa sitä, että aluksen kallistuessa pystyasennosta jatkuu kallistuminen, kunnes saavutetaan seuraava tasapainotila. Pienillä kallistuskulmilla vaihtokeskuskorkeus pysyy vakiona.

Vaihtokeskuskorkeuden laskemisessa käytettävät pisteet on esitetty kuvassa 2. Aluksen kölipiste K (engl. keel point) sijaitsee perustasossa, laivan keskilinjalla. Piste B on uppouman nostovoiman (engl. buoyancy) vaikutuspiste. Piste G esittää aluksen painopisteen (engl. center of gravity) paikan. Piste M on aluksen vaihtokeskus (engl. metacenter).



Kuva 2. Vakavuuslaskennan pisteet K, B, G ja M

Kuvassa 4 on esitetty GZ-kuvaaja, josta voidaan lukea aluksen oikeaseva momenttivarsi kallistuskulman funktiona.



Kuva 4. Esimerkki GZ-kuvaajasta.

2.3 Lisääntynyt paino tai menetetty uppouma

Vaurioituneen aluksen vakavuuden laskemiseen käytetään yleensä joko lisääntyneen painon tai menetetyn uppouman menetelmää. Molemmat menetelmät kuvaavat todenmukaisesti vuototilannetta mutta tarkastelevat sitä eri näkökulmista. Molemmat menetelmät antavat lopputilanteessa saman syväyksen, kallistuskulman ja oikeasevan momentin. Menetelmät antavat kuitenkin toisistaan poikkeavan uppouman, painopisteen ja vaihtokeskuskorkeuden, mikä on selitettävissä niiden erilaisella lähestymistavalla. SOLAS-vuotovakavuussäännöt olettavat käytettävän menetetyn uppouman menetelmää. [3]

Lisääntyneen painon menetelmässä aluksen sisään vuotava vesi käsitellään alukseen kuuluvana ylimääräisenä nestemäisenä lastina. Vettä vuotaa aluksen sisään niin pitkään, kunnes saavutetaan tasapainotila, jossa aluksen sisällä oleva vedenpinta on samalla korkeudella kuin ulkopuolella oleva meriveden pinta tai kunnes vaurioitunut vesitiivis osasto on kokonaan täyttynyt vedellä. Sisään vuotaneen veden painon vuoksi alus hakeutuu tasapainotilaan uudella syväyksellä ja kallistuskulmalla. Mikäli osasto täyttyy vain osittain vedellä, on otettava huomioon myös vapaan nestepinnan vaikutus. Mikäli vuoto on epäsymmetrinen, on vuodon seurauksena kallistuma. Tällöin aluksen tarkan tasapainotilan määrittämiseksi on käytettävä iteratiivista menetelmää, jossa jokaisella laskentakierroksella sisälle vuotaneen veden määrää lisätään, kunnes lopullinen tasapainotila löytyy.

Menetetyn uppouman menetelmässä vaurioituneen osaston tilavuuden katsotaan lakkaavan vaikuttamasta aluksen kelluvuuteen. Aluksen uppouma ei tarkastelussa muutu, joten sitä kutsutaan myös vakiouppouma-menetelmäksi. Lisäksi aluksen painopiste ja paino pysyvät

vakiona, sillä aluksen sisään vuotavaa vettä ei lasketa osaksi aluksen painoa. [4] Vaurion seurauksena alus hakeutuu uudelle syvyykselle ja kallistuskulmaan, jossa alukseen vaikuttavat voimat ja momentit ovat jälleen tasapainossa. Menetetyn uppouman menetelmässä aluksen sisään vuotava vesi ei kuulu osaksi lastia, jolloin sille ei tarvitse huomioida vapaan nestepinnan vaikutusta.

2.4 Vapaiden nestepintojen vaikutus

Suljetussa tilassa olevalla nesteellä on vapaa nestepinta, kun aluksen kallistuessa nesteen pinta ei pääse koskettamaan tilan kattoa tai pohjaa. Tällainen tilanne on esimerkiksi osittain täytetyssä nestetankissa tai aluksen osastossa, johon pääsee onnettomuuden seurauksena vuotamaan vettä. Vapaat nestepinnat huonontavat aluksen vakavuutta, sillä nesteen painopiste pääsee vapaasti siirtymään kallistuksen puolelle. Vapaan nestepinnan vaikutus aluksen alkuvaihtokeskuskorkeuteen voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\frac{\rho \cdot I_B}{A} \quad , \quad (5)$$

missä I_B on tankin vapaan nestepinnan pintahitausmomentti, joka lasketaan yhtälöllä

$$I_B = \frac{b^3 \cdot l}{12} \quad , \quad (6)$$

missä b ja l ovat tankin leveys ja pituus. Tästä huomataan, että tankin leveydellä on merkittävä vaikutus menetettyyn vakavuuteen. Tämä approksimaatio toimii vain pienillä kallistuskulmilla. [5]

2.5 Tuulen ja aallokon aiheuttama momentti

Sääolosuhteet onnettomuustilanteessa eivät ole välttämättä helppoja. Alukseen voi kohdistua voimakasta puuskaista tuulta ja aallokkoa, joista aiheutuu alusta kallistava momentti. Kun alus kallistuu, tekee kallistava momentti työn, jonka suuruus on suoraan verrannollinen kallistavan momenttivarren pituuteen ja kallistuskulman muutokseen. Vastaavasti alus joutuu tekemään vastaavan kokoisen, mutta oikaisevan työn palatessaan takaisin alkuperäiseen asentoonsa. Kallistavaa momenttia ja GZ-kuvaaja tarkastellessa voidaan havaita, että puuskan tai aallon aiheuttamalla kallistuskulmalla kallistavan momenttivarren ja GZ-käyrän rajaaman alueen pinta-alat ovat yhtäsuuret. GZ-käyrän positiivisen alueen alle jäävä pinta-ala kuvaa siten suurinta aalto- tai tuulikuormaa, josta alus pystyy selviytymään. Vakavuussäännöissä tämä voidaan huomioida asettamalla pienin pinta-ala, joka GZ-käyrän positiivisen alueen tulee rajata. Lisäksi rajoittamalla kallistuskulmaa, johon asti pinta-ala lasketaan, voidaan varmistaa, etteivät alimmat avonaiset aukot päädy kallistuksen seurauksena vedenpinnan alapuolelle. [2]

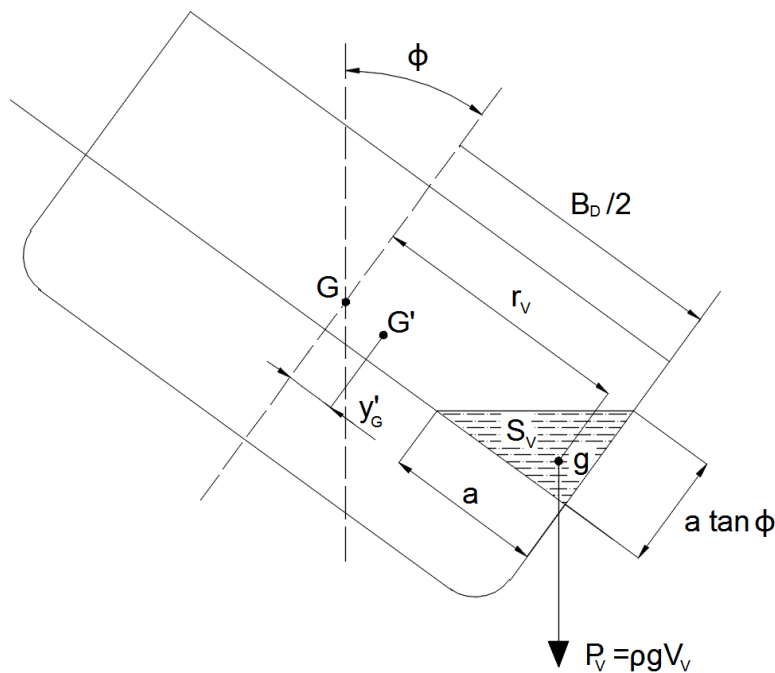
2.6 Vettä autokannella

Vettä autokannella kuvaa nimensä mukaisesti tilannetta, jossa syystä tai toisesta aluksen autokannelle pääsee kertymään vettä. Tutkimuksissa on havainnointu tilanteen kehittymistä. Aluksi aluksen vakavuus on riittävä ja alus keinuu aallokossa lähes normaalisti. Keinunnan seurauksena kannella oleva vesimassa siirtyy laidalta toiselle vaimentaen keinuntaa ja pidentäen keinunnan jakson pituutta [6]. Vesimäärän lisääntyessä saavutetaan lopulta

tilanne, jossa alus ei enää keinu pystyaseman molemmin puolin vaan laidalle siirtyneen veden massa saa aikaan pysyvän kallistuksen kyseiselle puolelle ja veden siirtyminen kannen poikki lakkaa. Tämän jälkeen lisääntyvä vesimäärä kasvattaa tasaisesti aluksen kallistusta, kunnes saavutetaan kriittinen vesimäärä. Tällöin vesimassan kallistava momentti ylittää aluksen oikaisevan momentin arvon ja alus kaatuu kyljelleen. Tämän seurauksena vesi pääsee virtaamaan vapaasti suojaamattomista aukoista aluksen sisään, mikä johtaa lopulta aluksen kääntymiseen täysin ympäri ja/tai uppoamiseen. [7]

Vettä kannella tilanteen tarkasteleminen vapaalla nestepinnalla on hyvin houkuttelevaa, sillä pitkä ja leveä autokansi tarjoaa mahdollisuuden suurelle vapaalle nestepinnalle. Tämä tarkastelumalli antaa kuitenkin hyvin pessimistisen arvion aluksen kyvystä selviytyä tilanteesta ja kuvaa tilannetta huonosti, sillä suhteellisesti ottaen vettä on autokannella vähän, tasaisesti levitettynä vain muutamien senttien paksuinen kerros. Aluksen kallistuessa vesi siirtyy aluksen toiselle laidalle, jolloin vapaa nestepinta pienenee murto-osaan koko autokannen pinta-alasta.

Parempi malli tilanteesta saadaan käsittelemällä veden vaikutus aluksen vakavuuteen liikkuvana nestemäisenä lastina, jonka aiheuttama kallistava momentti riippuu aluksen kulma-asennosta ja kannelle kertyneen veden määrästä. Tämä on esitetty kuvassa 5.[5]



Kuva 5. Vettä kannella. [5]

Kun kannelle pääsee kertymään vesimassa, jonka tilavuus on V_v , lasketaan sen aiheuttama kallistava momenttivarsi yhtälöllä

$$l_v = y'_G \cdot \cos \varphi, \quad (7)$$

missä y'_G on veden aiheuttama aluksen painopisteen poikittainen siirtymä ja φ on aluksen kallistuskulma. Aluksen painopisteen poikittainen siirtymä lasketaan yhtälöllä

$$y'_G = \frac{V_V \cdot r_V}{\nabla} , \quad (8)$$

missä r_V on veden painon vaikutuspisteen etäisyys aluksen keskitasosta. Se lasketaan yhtälöllä

$$r_V = \frac{B_D}{2} - \frac{1}{3} \sqrt{2 \frac{S_V}{\tan \varphi}} , \quad (9)$$

missä S_V on kannella olevan veden kolmionmuotoisen poikkileikkauksen pinta-ala. Se voidaan laskea seuraavasti:

$$S_V = \frac{V_V}{L_D} = \frac{a^2}{2 \tan \varphi} \quad (10)$$

Lisäksi on huomioitava, että sekä aluksen painopisteen poikittainen siirtymä että kallistava momenttivarsi riippuvat aluksen kallistuskulmasta. Tasapainotilan löytämiseksi käytetään iteratiivista laskentaa.

Mallikokeissa on havaittu, että aluksen autokannelle kertyy ennen aluksen kaatumista jopa enemmän vettä kuin staattisen tarkastelun perusteella olisi mahdollista. Syynä tähän on se, että alukseen osuvien aaltojen luovuttama energia auttaa alusta pysymään pystyssä pidempään.

3 IMO, SOLAS ja nykyinen sääntely

3.1 IMO

Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO, International Maritime Organization, perustettiin kansainvälisellä sopimuksella YK:n konferenssissa Genevessä vuonna 1948. Sopimus tuli voimaan vuonna 1958 ja ensimmäisen kokouksensa järjestö piti vuonna 1959. Järjestön päätoimipaikka sijaitsee Lontoossa.

Järjestön tarkoitus on toimia välineenä kansainvälisessä yhteistyössä, joka liittyy kansainväliseen kauppamerenkulun sääntelyyn ja teknisiin asioihin. Tavoite on ottaa käyttöön korkeimmat käytännöllisesti saavutettavissa olevat standardit koskien merenkulun turvallisuutta ja tehokkuutta. Lisäksi järjestön tarkoitus on purkaa kansainvälisen merenkulun epäreiluja ja tarpeettomia rajoitteita ja näin edistää merikuljetuspalvelujen saatavuutta maailmantalouden käyttöön. [8]

Järjestön korkeinta valtaa käyttää yleiskokous, joka pidetään kahden vuoden välein. Yleiskokoukseen voivat osallistua kaikki järjestön jäsenmaat. Yleiskokous äänestää 40 valtion edustajasta koostuvan neuvoston, joka toimii järjestön päättävänä elimenä kokousten välillä. [9]

Suurinosa järjestön työstä tapahtuu komiteoissa ja ala-komiteoissa. Nykyisellään (2016) järjestössä on viisi komiteaa. Merenkulun turvallisuuskomitea (MSC, Maritime Safety Committee) perustettiin samassa yhteydessä IMO:n kanssa. Se vastaa kaikista merenkulun turvallisuuteen vaikuttavasta sääntelystä sekä toimii merellä tapahtuvaa rikollisuutta vastaan.

Meriympäristön suojelukomitea (MEPC, Marine Environment Protection Committee) perustettiin marraskuussa 1973 ja sen tarkoitus on vähentää alusten ympäristölle aiheuttamaa kuormitusta. Oikeudellinen komitea (LC, Legal Committee) perustettiin 1967 ja se vastaa kaikista järjestön lakiteknisistä asioista. Tekninen yhteistyökomitea (Technical Co-operation committee) koordinoi työtä järjestössä ja tarjoaa tukea teknisissä asioissa, etenkin kehittyvissä maissa. Meriliikenteen helpottamistyön komission (Facilitation committee) tehtävänä on helpottaa kansainvälistä merenkulkua ja vähentää ja yksinkertaistaa meriliikenteeseen liittyviä muodollisuuksia byrokratiaa. [9]

Lisäksi järjestössä toimivat seuraavat alakomiteat: Ihmiselementin, koulutuksen ja vahdinpidon alakomitea, IMO instrumenttien implementoinnin alakomitea, navigoinnin alakomitea, yhteydenpidon ja etsintä- ja pelastustoimen alakomitea, saasteiden ehkäisyn ja torjunnan alakomitea, alusten suunnittelun ja rakentamisen alakomitea, alusjärjestelmien alakomitea sekä rahti- ja konttikuljetusten alakomitea. [9]

Komiteoidensa välityksellä kansainvälinen merenkulkujärjestö ylläpitää monia kansainvälisiä yleissopimuksia. Alusten suunnitteluun vaikuttavia ovat etenkin pienimmät turvallisuusvaatimukset asettava SOLAS yleissopimus, ympäristövaatimukset asettava MARPOL yleissopimus sekä varalaitavaatimukset asettava kansainvälinen lastiviivayleissopimus ICLL. Lisäksi muilla yleissopimuksilla määritellään vaatimuksia mm. alusten operointiin, miehistön koulutukseen, yhteydenpitoon, vaarallisten lastien kuljetukseen sekä alusten kierrätykseen. [9]

3.2 SOLAS

SOLAS on tärkein ja myös yksi vanhimmista meriliikenteen turvallisuuteen vaikuttavista kansainvälisistä sopimuksista. Ensimmäinen versio sopimuksesta solmittiin vuoden 1914 konferenssissa Lontoossa.

1800- ja 1900-lukujen taite oli merellä tapahtuvan matkustajaliikenteen kulta-aikaa. Lentoliikennettä ei ollut ja muuttoliike Euroopasta Amerikkaan ja muualle maailmaan oli edelleen voimakasta. Merellä sattui useita onnettomuuksia ja esimerkiksi pelkästään brittiläisillä laivoilla menehtyi 700-800 henkeä vuosittain. SOLAS-yleissopimuksen syntymiseen vaikutti voimakkaasti White Star varustamon Titanic aluksen onnettomuus huhtikuussa 1912. Onnettomuudessa menetettiin yli 1500 henkeä ja tapahtuma herätti paljon kysymyksiä meriliikenteen turvallisuustasosta. Yhdistyneen kuningaskunnan hallitus kutsui koolle kansainvälisen kokouksen meriliikenteen turvallisuussääntöjen kehittämiseksi. Kokouksessa oli edustus 13 valtiosta ja SOLAS-yleissopimus solmittiin 20. tammikuuta 1914. [10]

Sopimuksen oli tarkoitus astua voimaan vuoden 1915 heinäkuussa, mutta Euroopassa syttyneen ensimmäisen maailmansodan seurauksena tämä ei koskaan tapahtunut. Seuraava kokous pidettiin vuonna 1929 Lontoossa ja siellä solmittiin uusi SOLAS-yleissopimus, joka tuli voimaan 1933. Sopimuksessa uudistettiin mm. meriteiden sääntöjä yhteentörmäämisen välttämiseksi. [10]

Vuonna 1948 Yhdistynyt kuningaskunta isännöi jälleen kansainvälisen konferenssin. Voimassa ollut vuoden 1929 yleissopimus oli jäänyt jälkeen kiihtyvistä teknisistä kehityksestä. Tärkeitä uudistuksia tehtiin mm. vesitiivistä osastointia ja vakavuutta sekä rakenteellista paloturvallisuutta koskeviin sääntöihin. [10]

Samana vuonna YK perusti kansainvälisen merenkulkujärjestö IMO:n ja SOLAS-yleissopimuksen ylläpitäminen ja kehittäminen siirrettiin tämän järjestön alaisuuteen. Tarkoitus oli, että järjestö pystyisi aikaisempaa säännöllisempään yleissopimuksen kehittämiseen, mutta todellisuudessa sopimuksen ratifioimisessa meni todella pitkään ja seuraava yleiskokous pidettiin vasta vuonna 1959. Tällöin todettiin, että edellisen yleissopimuksen uudistamisen sijaan käyttöön otetaan uusi, neljäs SOLAS-yleissopimus. [10]

Vuoden 1960 SOLAS-konferenssi on ensimmäinen, joka pidettiin IMO:n alaisuudessa. Uudessa sopimuksessa huomioitiin jälleen tekninen kehitys ja useita aikaisemmin vain matkustajalaivoille sovellettavia sääntöjä laajennettiin koskemaan myös rahtialuksia. Kokonaisuudessa konferenssi teki 56 päätöslauselmaa, jotka tulivat määrittämään IMO:n työtä tulevaisuudessa. Vuoden yleissopimus tuli voimaan vuonna 1966 ja siitä lähtien sitä kehitettiin lähes vuosittain. [10]

1960 luvulla YK:n ja IMO:n jäsenvaltioiden määrä kasvoi voimakkaasti uusien valtioiden itsenäistyessä. Monet uusista jäsenvaltioista perusti oman kauppalaivastonsa ja sitoutui SOLAS yleissopimukseen. Tämän seurauksena yleissopimus oli ajautumassa ongelmiin; Vaatimuksena SOLAS-yleissopimusten muutoksen voimaantulemiseen oli, että vähintään kaksi kolmasosaa sopimuksen osapuolista on ratifioinut sopimuksen. Kasvaneella jäsenmäärällä uhkana on, että ratifioimisen vaatima aika kasvaa niin pitkäksi, että muutokset olisivat voimaantullessaan ajastaan jääneitä. [10]

Tilanteen korjaamiseksi IMO järjesti Lontoossa vuonna 1974 SOLAS-konferenssin, jossa solmittiin nykyinen SOLAS 1974 yleissopimus. Tärkeänä uudistuksena oli nk. hiljaisen hyväksynnän (eng. tacit acceptance) käyttöönotto sopimuksen muutosten läpiviemisessä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että muutokset sopimukseen tulevat voimaan, ellei niitä vastusta yli kolmasosa sopimusmaista tai sopimusmaat, joiden yhteenlasketun kauppalaivaston tonnisto ylittää 50% maailman kauppalaivastosta tonnistosta. Tämä nopeutti sopimusten muutosten voimaan tulemistä merkittävästi. 1974 SOLAS-yleissopimus tuli voimaan toukokuussa 1980. [10]

IMO on sopimuksen voimaantulon jälkeen kyennyt reagoimaan nopeasti tekniseen kehitykseen ja havaittuihin puutteisiin, joista osa on tosin tullut ilmi vasta onnettomuuksien tapahduttua. Nykyisellään uudistukset SOLAS-yleissopimukseen tulevat voimaan neljän vuoden välein. [10]

3.3 SOLAS 1990

SOLAS 1990 -vuotovakavuussääntö perustuu vuoden 1974 SOLAS-yleissopimuksen vuotovakavuussääntöön.

Deterministisen vuotovakavuustarkastelun tarkoituksena on, että alus täyttää kaikki kriteerit, joilla sen katsotaan selviytyvän tilanteista, joissa aluksen yhteen tai useampaan osastoon pääsee vuotamaan vettä. Kriteereinä ovat sekä vuodonaikaiset että vuodon tasaantumisen jälkeiset vakavuuslaajuudet, positiivisen oikaisevan momenttivarren suuruus ja sen rajaama alue, jäännösvaihtokeskuskorkeus sekä suurimmat sallitut kallistuskulmat. Vuotovakavuustarkastelu suoritetaan huonoimman tuloksen antavalla lastitilanteella.

Vuotovakavuussäännön perusteena on, että alus on osastoitu useaan vesitiiviiseen osastoon, joiden suurin sallittu pituus määräytyy vuotopituuden ja osastointitekijän perusteella. Vuotopituudella tarkoitetaan osaston pituutta, jolla kyseiseen osastoon tapahtuneen vuodon tasaannuttua aluksen upporaja (margin line) on vedenpinnan tasalla, kun otetaan huomioon myös vuodon seurauksena tapahtuva aluksen kellumisasennon muutos. Upporaja on määritelty viivaksi, joka kulkee aluksen ulkoreunaa pitkin 76 mm aluksen laipiokannen yläpinnan alapuolella. Laipiokansi on ylin kansi, johon aluksen vesitiiviin osastoinnin muodostavat poikittaiset laipiot ylettyvät. Osastointitekijä lasketaan aluksen rungon geometriasta, käyttötarkoituksesta sekä miehistön ja matkustajien määrästä. Suurin sallittu vesitiiviiden laipioiden välinen etäisyys saadaan kertomalla vuotopituus osastointitekijällä. Osastointitekijän perusteella aluksen tulee selviytyä yhden, kahden tai kolmen vierekkäisen osaston vaurioitumisesta. Oletetun vaurion pituudeksi on määritelty 3 metriä + 3% aluksen pituudesta, kuitenkin enintään 11 metriä ja tunkeumaksi viidesosa aluksen leveydestä. Vauriota ei ole rajoitettu korkeussuunnassa.[11]

Vuoden 1995 muutoksessa matkustaja-autolautoille, jotka kuljettavat vähintään 400 henkilöä, tuli uutena vaatimuksena, että niiden tulee selviytyä vauriosta, joka osuu mihin tahansa aluksen kyljen matkalle. Käytännössä tämä tarkoittaa, että aluksen tulee säilyttää vakavuutensa minkä tahansa kahden vierekkäisen osaston vuototilanteessa.

Matkustaja-aluksen katsotaan selviytyvän vauriosta, mikäli se täyttää seuraavat kriteerit [11]:

Vuodon tasaannuttua:

- Positiivinen jäännösvakavuuslaajuus on vähintään 15 astetta, ja;
- oikaisevan momenttivarren GZ alainen alue on vähintään 0,015 metri-radiaania, laskettuna tasapainotilasta vuotokulmaan, tai 22 asteen kallistuskulmaan asti yhden osaston vaurioissa ja 27 asteen kallistuskulmaan asti kahden tai useamman osaston vaurioissa, ja;
- oikaisevan jäännösmomenttivarren tulee olla vähintään 0,1 metriä, kun otetaan huomioon kallistava momentti, joka aiheutuu tuulen vaikutuksesta, pelastusveneiden laskemisesta tai kaikkien matkustajien siirtyessä aluksen toiselle reunalle.

Lisäksi epäsymmetrisen vuodon tapauksessa:

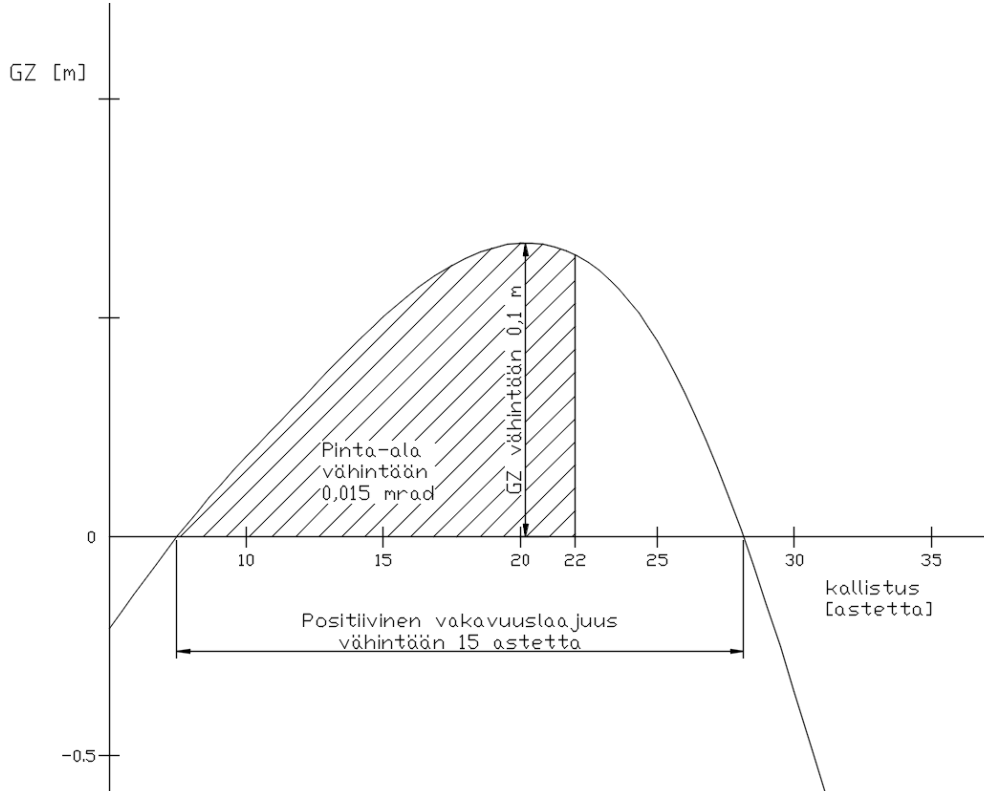
- Positiivisen jäännösvaihtokeskuskorkeuden tulee olla vähintään 0,05 metriä, ja;
- kallistuskulma on enintään 7 astetta yhden, ja 12 astetta kahden tai useamman osaston vauriossa, ja;
- upporaja on vedenpinnan yläpuolella.

Ennen vuodon tasaantumista:

- Suurimman oikaisevan momenttivarren tulee olla vähintään 0,05 metriä, ja;
- positiivisen vakavuuslaajuuden vähintään 7 astetta, ja;
- kallistuskulma enintään 15 astetta.

Vuodon tasaantumiseen saa kulua enintään 15 minuuttia.

Solas 1990 vuotovakavuuskriteerit yhden osaston vauriotapauksissa on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6. Solas 1990 vuotovakavuuskriteerit yhden osaston vauriotapauksessa.

3.4 2003/25/EC eli Tukholman sopimus

Matkustaja-autolautta Estonia kaatui ja upposi Suomenlahdella 28. syyskuuta 1994 ollessaan matkalla Tallinnasta Tukholmaan. Syynä onnettomuuteen oli aluksen keulavisiiri, joka irrotessaan veti keularampin täysin auki. Tämän seurauksena avoimesta keulan kulkuaukosta kertyi aluksen autokannelle aaltojen mukana paljon vettä ja alus alkoi kallistua välittömästi. Kallistuma kasvoi nopeasti ja 10 minuutissa kallistuma saavutti 40 astetta, jolloin merivesi pääsi vapaasti virtaamaan 4. kannen rikkoontuneiden ikkunoiden kautta aluksen sisään. Lisäksi aluksen sisätiloista poispääseminen vaikeutui merkittävästi kallistuskulman kasvaessa. Muiden alusten tutkakuvista Estonia hävisi 35 minuuttia keulavisiirin irtoamisen jälkeen. Onnettomuudessa menehtyi 852 henkeä ja se on Itämeren alueen tuhoisin yksittäinen merionnettomuus. [12]

Edellinen vakava onnettomuus oli tapahtunut vain seitsemän vuotta aiemmin matkustaja-autolautta Herald of Free Enterprisen kaaduttua Pohjanmerellä Zeebrugge:n sataman edustalla vuonna 1987. Tässä onnettomuudessa menehtyi 193 henkeä ja tässäkin tapauksessa syynä oli keulaportista autokannelle päässyt vesi. Estonia-onnettomuuden jälkeen vettä-kannella-tilannetta ryhdyttiin tutkimaan mallikokein ja tietokonesimuloinnein, sillä RoPax-alusten turvallisuutta olisi parannettava pikaisesti. [13] Tutkimuksissa havaittiin, että aluksen kallistuma kasvoi tasaisesti veden kerääntyessä autokannelle, kunnes tietyn kriittisen kallistuskulman jälkeen alus kaatui nopeasti. Kriittinen kallistuskulman havaittiin olevan hyvin lähellä suurimman oikeaseisuvan momentin kulmaa θ_c , kun veden annetaan kertyä vaurioaukosta vapaasti autokannelle. Lisäksi mallikokeissa aluksen autokannella kaatumishetkellä olevan veden määrän huomattiin vastaavan hyvin sitä vesimäärää, joka laskennallisesti saa aluksen kallistumaan kulmaan θ_c . [7]

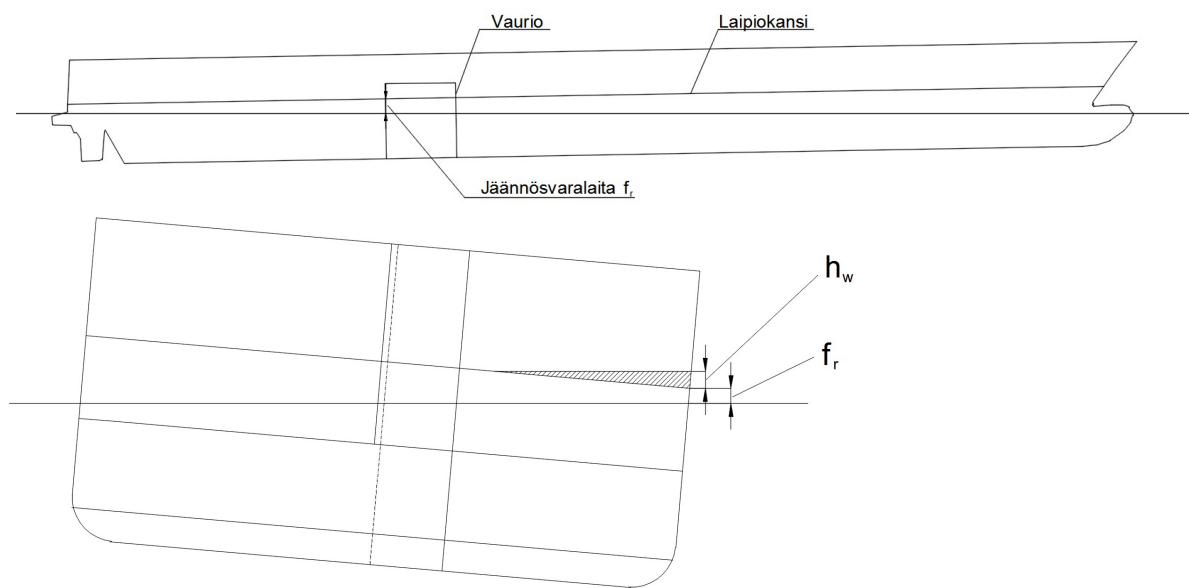
Lisäksi tutkimuksissa havaittiin kannelle kerääntyvän veden määrän olevan riippuvainen merkitsevistä aallonkorkeudesta sekä aluksen jäännösvaralaidasta. Solas 90 mukaisesti rakennettujen RoPax-alusten havaittiin selviytyvän 1,5 metrin merkitsevään aallonkorkeuteen asti (IMO). 4 metrin aallonkorkeutta vastaava vedenkorkeus autokannella oli 0,5 metriä. Mikäli jäännösvaralaidan suhde merkitsevään aallonkorkeuteen oli enemmän kuin 0,5, ei autokannelle kerääntynyt juurikaan vettä. [13]

Vuonna 1995 IMO antoi päätöslauselman, jonka mukaan jäsenvaltiot voivat asettaa alueellisia vaatimuksia, jotka ovat tiukempia kuin SOLAS:n vaatimukset. Konferenssissa julkaistiin laskentamenetelmä vettä kannella tilanteeseen. Tämän menetelmän mukaisesti autokannella oletettaisiin olevan vettä 0,5 metrin kerros tasaisesti jakautuneena ja aluksen vaaditaan selviytyvän SOLAS 90 vaatimusten mukaisesti, sallien kuitenkin uppoviivan joutuminen vedenpinnan alapuolelle. [14]

Vuonna 1996 27.-28. helmikuuta kahdeksan Pohjois-Euroopan maata solmi ns. Tukholman sopimuksen, joka koskee näiden maiden satamiin säännöllisesti liikennöiviä matkustaja-autolauttoja. Tämän sopimuksen mukaisessa laskentamenetelmässä autokannelle kertyvän veden määrä ei ole vakio 0,5 m³/m², vaan riippuu vaurioituneen aluksen kallistuskulmasta ja jäännösvaralaidasta sekä operointialueen merkitsevistä aallonkorkeudesta. [15] & [16]

Sopimuksen oletuksena on, että alus toimii alueella, jossa merkitsevä aallonkorkeus 4,0 metriä esiintyy vuoden aikana yli 10% todennäköisyydellä. Mikäli aluksen

jäännösvaralaita on 0,3 metriä tai vähemmän, on laskettava aluksen autokannelle kertyvän vettä 0,5 metrin korkeuteen asti. Jäännösvaralaidan ollessa 2,0 metriä tai enemmän, ei autokannelle kerry vettä. Jos jäännösvaralaidan korkeus on 0,3 ja 2,0 metrin välissä, on laskelmassa oletettava vedenkorkeus interpoloitava vastaavasti 0,0 ja 0,5 metrin väliin. Vastaavalla tavalla operointialueella vuoden aikana yli 10% todennäköisyydellä esiintyvän korkeimman merkitsevän aallonkorkeuden ollessa alle 4,0 metriä, voidaan edellä jäännösvaralaidan mukaan laskettua vedenkorkeutta edelleen vähentää interpoloimalla siten, että 1,5 metrin merkitsevällä aallonkorkeudella kannelle oletettavaksi vedenkorkeudeksi tulee 0,0 metriä. Laskelmassa oletettava vedenkorkeus mitataan vuodon seurauksena kallistuneen aluksen autokannen alimmasta kohdasta tai vedenpinnasta, mikäli edellä mainittu kannen alin kohta on vedenpinnan alapuolella. Tätä on havainnollistettu kuvassa 7. [17]



Kuva 7. Vedenkorkeus autokannella Tukholman sopimuksen vauriotapauksissa.

Tutkimuksissa on havaittu, että Tukholman sopimuksen mukaisesti laskettu vuotovakavuus aliarvioi aluksen todellista kykyä selviytyä vettä kannella –tilanteesta [18]. Sääntö antaa vaihtoehtoiseksi tavaksi mahdollisuuden osoittaa aluksen vuotovakavuus mallikokeiden avulla. Mallikokeilla on tarkoitus osoittaa aluksen selviytyminen pahimmasta SOLAS 90 vauriosta. Mallinnettavana aallokkona käytetään pitkäharjaista Jonswap-aaltospektrin mukaista epäsäännöllistä aallokkoa. Mallin annetaan ajalehtia vapaasti aaltojen mukana, ohjaten suuntaa kuitenkin siten, että malli kohtaa aallot poikittain, vaurioaukko kohti tulevia aaltoja. Mallin tulee pysyä pystyssä vähintään 30 minuuttia, täysmittakaavaan skaalattuna. Mallin katsotaan pysyvän pystyssä, kun sen kallistuskulma ei ylitä pysyvästi 20 astetta tai 30 astetta yli 20% keinuntasykleistä. [17]

Euroopan unioni laajensi Tukholman sopimuksen koskemaan kaikkia unionin jäsenmaita direktiivillä 2003/25/EY. Direktiivin mukaisesti kaikkien direktiivin alaisten uusien matkustaja-autolauttojen on täytettävä Tukholman sopimus. Lisäksi ennen direktiiviä rakennettujen matkustaja-autolauttojen on täytettävä vaatimukset 1. lokakuuta 2010 mennessä. [17]

3.5 Probabilistinen vuotovakavuuslaskenta ja SOLAS 2009

Probabilistisen vuotovakavuuslaskennan tarkoituksena on kuvata todennäköisyys, jolla laiva selviytyy siihen kohdistuvasta yhteentörmäyksestä kaatumatta tai uppoamatta. Ajatuksena on se, että yhteentörmäyksessä vaurion sijainti ja laajuus ovat tiettyä tilastollista todennäköisyysjakaumaa noudattavia satunnaismuuttujia. Näiden todennäköisyysjakaumien perusteella voidaan laskea todennäköisyys, jolla merivesi pääsee vuotamaan tiettyihin yhteen tai useampaan vierekkäiseen osastoon. Lisäksi vertaamalla aluksen vakavuutta em. osastoon/osastoihin kohdistuneen vuodon jälkeen tilastojen pohjalta asetettuihin vakavuuskriteereihin, voidaan arvioida todennäköisyys, jolla alus selviytyy kyseessä olevasta vauriosta. Kun tiedetään todennäköisyys, jolla osasto vaurioituu sekä todennäköisyys, jolla alus selviää tästä vauriosta, voidaan kaikki mahdolliset tapaukset yhteenlaskemalla selvittää todennäköisyys, jolla alus tilastollisesti tarkasteltuna selviytyy yhteentörmäyksestä.

IMO esitteli jo vuonna 1973 dokumentilla A 265(VIII) probabilistinen, eli todennäköisyyksiin perustuvan laskentatavan vaihtoehtona matkustaja-aluksen vuotovakavuuden osoittamiseksi. SOLAS 1990 muutoksen yhteydessä nähtiin tarpeelliseksi varmistaa, että myös jo olemassa olevien alusten turvallisuustaso nostetaan tarvittaessa vastaamaan voimaantulevia vaatimuksia. Päivämäärä, jolloin aluksen viimeistään tulisi täyttää määräykset, porrastettiin alukselle laskettavan A/A_{max} suhteen mukaisesti. Tämä taas lasketaan dokumentin MSC/Circ.547 mukaisella yksinkertaistetulla mallilla, joka perustuu aikaisempaan A265(VIII)-dokumenttiin. [19]

SOLAS 2009 muutoksessa matkustaja-alusten ja rahtialusten vuotovakavuuden laskentaa yhtenäistettiin ottamalla käyttöön myös matkustaja-aluksille probabilistinen laskentatapa ensisijaisena menetelmänä aluksen vuotovakavuuden selvittämiseksi. SOLAS 2009 probabilistinen menetelmä perustuu aikaisempaan A 265(VIII) -menetelmään. SOLAS 2009:ssä indeksien laskentaa on muutettu aikaisempaan menetelmään verrattuna käytännönläheisemmäksi ja kriteerit on päivitetty Euroopan Unionin HARDER-projektin yhteentörmäyksistä keräämään aineistoon perustuen. Siirryttäessä deterministisestä laskentatavasta probabilistiseen IMO piti tärkeänä, että turvallisuustaso pysyy samalla tasolla aikaisempaan verrattuna. [20]

Probabilistisessa laskentatavassa alukselle määritetään vaadittava osastointi-indeksi, R-indeksi, joka on riippuvainen aluksen osastointipituudesta ja henkilömäärästä. Alukselle lasketaan A-indeksi, joka kuvaa aluksen selviytymistä vuototilanteesta. Alus katsotaan riittävän turvalliseksi, mikäli A>R. [21]

A-indeksi lasketaan painotettuna keskiarvona kolmelle eri lastitilanteelle, jolloin saadaan osaindeksit A_s, A_p ja A_l.

$$A = 0,4A_s + 0,4 A_p + 0,2 A_l$$

Osaindeksi A_c saadaan summaamalla kaikkien vauriotilanteiden todennäköisyyden p_i ja kyseisestä vauriotilanteesta selviytymisen todennäköisyyden s_i tulo, eli

$$A_c = \sum p_i s_i \quad ,$$

missä indeksi c kuvaa yhtä lastitilanteista s , p tai l

Vauriotilanteen todennäköisyys p_i kuvaa todennäköisyyttä, jolla vuoto osuu kyseiseen osastoon tai vierekkäisten osastojen muodostamaan ryhmään. Todennäköisyys p_i on riippuvainen vesitiiviin osaston pituudesta sekä pitkittäisten vesitiiviiden laipioiden sijainnista. Vaurio voi osua yhtäsuurella todennäköisyydellä mihin tahansa aluksen pituussuunnassa. [22] Laskennassa otetaan huomioon myös IMO:n vauriotilastojen mukainen jakauma vaurioiden pituudelle. Suurin pituus vauriolle voi olla 60 metriä ja suurin tunkeuma $B/2$. [21]

Todennäköisyys vauriosta i selviytymiseen on s_i . Selvitystodennäköisyyden laskennassa otetaan huomioon vaurioituneen aluksen oikeisevan momenttivarren pituus sekä positiivinen jäännösvakavuuslaajuus sekä kallistuskulma. Lisäksi huomioidaan suurin kallistava momentti, joka aiheutuu matkustajien sijoittumisesta aluksen reunalle, pelastusveneiden laukaisemisesta tai tuulen vaikutuksesta. Mikäli ennen vuodon tasaantumista on välivaiheita, jotka vaarantavat aluksen vakavuuden, huomioidaan ne selviytymistodennäköisyyttä s_i laskettaessa. [21]

4 Kohti turvallisempia matkustaja-autolauttoja

4.1 SOLAS 2009 - Heikkouksia löytyy

Merenkulun turvallisuuskomitean 84:ssä kokouksessa Euroopan Unionin jäsenmaat toivat julki huolensa siitä, että tulossa olevassa SOLAS 2009 vuotovakavuussäännössä jätettiin kokonaan huomioimatta matkustaja-autolautoille ominainen vettä kannella -ilmiö. Veden päätyminen autokannelle on vaarallinen tilanne, sillä se aiheuttaa aluksen nopean kallistumisen ja kaatumisen, jolloin aluksen evakuointi voi epäonnistua [23]. HARDER-tutkimusprojektissa, jonka tuloksien pohjalta SOLAS 2009 on kehitelty [24], havaittiin, että mikäli vaurioituneen matkustaja-autolautan GZmax on arvoltaan vähintään 0,25 m, selviytyy alus kaatumaatta aallokossa, jonka merkitsevä aallonkorkeus on 4,0 metriä. Muilla aluksilla riittävä GZmax-arvo vastaavissa olosuhteissa on 0,12 metriä. Jälkimmäinen arvo kuitenkin päättyi SOLAS 2009 vuotovakavuussääntöön, selviytymistä kuvaavan skertoimen määrittävänä kriteerinä. [3]

Eurooppalaisen telakkateollisuuden kattojärjestö CESA ilmaisi samassa kokouksessa jakavansa Euroopan Unionin tavoitteen siitä, että vuotovakavuus säännöt varmistavat korkean turvallisuustason kaikille alustypeille. Järjestö kuitenkin huomautti, että telakkateollisuus on vakuuttunut SOLAS 2009 takaavan vähintään yhtä hyvän vuotovakavuuden kuin edellinen SOLAS 1990 lisättynä Tukholman sopimuksen mukaisella vettä kannelle -tarkastelulla. Jotta saavutetaan enemmän hyötyä, tulisi CESA:n mukaan samassa yhteydessä tutkia myös, miten hyvin SOLAS 2009 sopii yhteen muun sääntelyn kanssa matkustaja-autolauttojen tapauksessa. [25]

Merenkulun turvallisuuskomitea päätti ottaa SOLAS 2009 vuotovakavuussäännön tarkastamisen korkean prioriteetin työlistalleen. Työn koordinointi siirrettiin vakavuus, lastiviiva ja kalastusalusten turvallisuus -alakomitealle (SLF, Sub-committee on Stability, Load lines and on Fishing vessel safety, alakomitean nimelle ei ole vakiintunut suomenkielistä vastinetta), joka aloittaisi aiheen käsittelyn 52:ssa kokouksessaan. [26]

SLF 52:ssa kokouksessa käytiin läpi kolme valmistunutta tutkimusta. Eurooppalaisen telakkateollisuuden yhteenliittymä EUROYARDS oli analysoinut 14 erilaisen RoPax-aluksen vuotovakavuuden ja huomioi, että SOLAS 2009 säännöllä on mahdollista suunnitella alempi LLH autokansi laajemmaksi, B/5 suojauksen ulkopuolelle aina B/10 asti. Tällöin vauriot, jotka yltyvät suojausta pidemmälle, aiheuttavat vakavamman vuototilanteen, kuin B/5 leveydelle yltyvillä pitkittäisillä laipioilla suojatulla LLH autokannella. Näissä tapauksissa Tukholman sopimuksen mukaisesti tarkasteltuna vuotovakavuusvaatimukset ovat suuremmat kuin SOLAS 2009 säännöllä. [27]

Konsulttiyhtiö Safety at Sea:n ja suunnittelutoimisto Deltamarin muodostama yhteenliittymä tarkasteli omassa tutkimuksessaan kahta ulkoisesti identtistä matkustaja-autolauttaa. Toinen aluksista oli varustettu LLH autokannella, jolloin saavutettiin 16% enemmän lastinkuljetuskapasiteettia, mutta GM-vaatimus SOLAS 2009 täyttämiseksi oli 1,17 m suurempi kuin ilman LLH autokantta. Lisäksi tutkimus arvioi Tukholman sopimuksen olevan voimassa olevista vuotovakavuussäännöistä vaativin. [27]

HSVA:n toteuttamassa EMSA 1 tutkimuksessa tarkasteltiin 80 ja 200 metrin pitkiä matkustaja-autolauttoja, joista suurempi oli varustettu LLH autokannella. Molemmat

alukset täyttivät SOLAS 2009 vaatimukset, mutta tietokonesimuloinnissa alusten vuotovakavuudessa havaittiin puutteita. Pienempi aluksista kaatui tyypillisissä vaurio-tilanteissa jo 3,0 metrin merkitsevällä aallonkorkeudella, ilman autokannelle kertyvän veden vaikutusta. Suurempi aluksista menetti vakavuutensa ja kaatui nopeasti, osassa vauriotapauksista jopa tyynessä vedessä, mikäli vaurion seurauksena pääsi vettä LLH-autokannelle. Havainnot vahvistettiin mallikokeilla.[28]

Tulosten perusteella kokouksessa muodostettiin yhteenvetona, että SOLAS 2009 vuotovakavuussääntöön on syytä tehdä muutoksia. Sen sijaan kokouksessa ei päästy yksimielisyyteen tavasta, jolla SOLAS 2009 kehitettäisiin, vaan näkemyksenä oli, että lisää tutkimuksia tarvittaisiin parhaan ratkaisun löytämiseksi. [27]

4.2 Ratkaisuja aluksen vuotovakavuuden kasvattamiseksi

Risteilyaluksiin ja matkustaja-autolauttoihin soveltuvia teknisiä ratkaisuja aluksen vuotovakavuuden parantamiseksi on selvitetty paljon eri tutkimuksissa. Erityisesti matkustaja-autolautoille ollaan etsitty ratkaisuja, joilla aluksen vuotovakavuutta saadaan parannettua vettä kannella -tilanteissa. Aiheesta on kirjoittanut diplomityön Pauli Miettinen, joka tutki diplomityössään [29] osastoinnin, laipiokannen korkeuden ja aluksen leveyden vaikutusta RoRo-rahtialuksen vettä kannella tilanteen vuotovakavuusvaatimuksiin.

Hyvällä ratkaisulla parannetaan merkittävästi aluksen turvallisuutta ja ratkaisun vaikutus aluksen elinkaarikustannuksiin on maltillinen. Parhaassa tapauksessa ratkaisu kasvattaa aluksen kapasiteettia, jolloin aluksen taloudellinen tehokkuus voi parantua. Seuraavassa on esitelty erilaisia ratkaisuja, joilla aluksen vuotovakavuutta pyritään parantamaan ja A-indeksiä kasvatettua.

Aluksen leventäminen

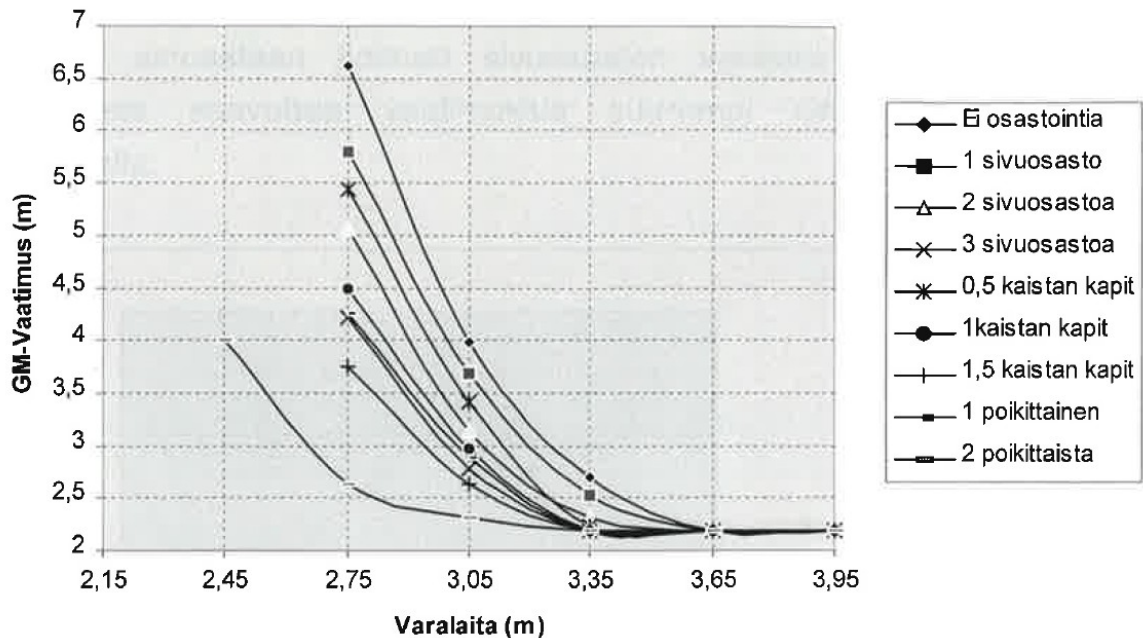
Aluksen leventäminen on yksinkertainen ja tehokas ratkaisu, jolla aluksen vuotovakavuutta voidaan parantaa. Vaikutus perustuu siihen, että se kasvattaa aluksen vesiviivapinnan pintahitausmomenttia I_w , minkä seurauksena aluksen vaihtokeskuskorkeus kasvaa. Tutkimuksissa aluksen leventämisellä 0,2-0,7 metriä alkuperäisestä saavutettiin 3...15 % lisäys A-indeksiin. Lisääntyneen vakavuuden lisäksi leveämmässä aluksessa on enemmän pinta-alaa, joka voidaan mahdollisesti käyttää hyödyksi esimerkiksi lisääntyneenä kuljetuskapasiteettina. [1] & [30]

Haittapuolena leveämmällä aluksella verrattuna alkuperäiseen on kasvanut kulkuvastus, mistä suorana seurauksena on suurempi polttoaineenkulutus. Lisäksi aluksen suurempi vakavuus vahvistaa aluksen reagointia merenkäyntiin, aiheuttaen lastiin ja matkustajiin kohdistuvia suurempia kiihtyvyyksiä. Seurauksena on matkustusmukavuuden heikentyminen sekä ääritapauksissa jopa vahingot lastille tai lastinsitomistarvikkeille. Liian vakaan aluksen liikkeitä voidaan hillitä varustamalla alus pallekölein tai evävakaimilla.

Laipiokannen kohottaminen

Laipiokannen kohottaminen vähentää autokannelle kerääntyvän veden määrää, sillä se kasvattaa vuodon seurauksena kallistuneen aluksen jäännösvaralaitaa. Estonian onnettomuuden jälkeen suoritetuissa tutkimuksissa havaittiin, että mikäli jäännösvaralaidan suhde merkitsevään aallonkorkeuteen on suurempi kuin 0,5, on autokannelle kertyvän

veden määrä hyvin vähäinen tai olematon [13] & [31]. Miettisen diplomityössä [29] havaitaan, että laipiokannen korkeuden kasvattaminen yli 12%:iin tutkitun aluksen leveydestä on tarpeetonta, sillä aluksen minimi-GM-vaatimus ei tämän jälkeen laske. Laipiokannen korkeuden merkitystä korostaa diplomityössä tehty havainto siitä, että liian alhaalla olevaa laipiokanta on hyvin vaikea kompensoida millään osastointiratkaisulla. Tämä on havainnollistettu kuvassa 8.



Kuva 8. Pauli Miettisen diplomityössä tutkittujen yleisjärjestelyversioiden GM-vaatimus varalaidan funktiona. [29]

Kääntöpuolena laipiokannen kohottamisessa on se, että samalla aluksen painopiste siirtyy korkeammalle, mikä puolestaan vähentää aluksen vakavuutta. Ratkaisun vaikutus aluksen turvallisuuteen täytyy tarkastella tapauskohtaisesti.

Poikittaiset vesitiiviit laipiot autokannella

Poikittaisilla vesitiiviillä laipioilla saadaan tehokkaasti rajoitettua vuotoveden leviämistä autokannella aluksen pituussuunnassa. Seurauksena vuodon saanut osasto saavuttaa pienemmällä vesimäärällä tasapainotilan sisään ja ulos virtaavan veden välillä. Tällöin autokannelle kerääntyvän veden kokonaismäärä ja kallistava momentti jäävät pienemmäksi ja todennäköisyys aluksen selviytymiseen kasvaa. Autokannen osastoinnilla saavutettiin lähes 4 %-yksikön lisäys A-indeksiin. [15] & [32]

Tutkimusprojekteissa ratkaisun kustannustehokkuus arvioitiin hyvin heikoksi verrattuna muihin esitettyihin vaihtoehtoihin. Merkittävänä syynä tähän on oletus siitä, että aluksen tulisi pysyä alkuperäisessä aikataulussa nopeutta kasvattamalla, vaikka aluksen purku- ja lastausajat satamassa kasvavat oletuksen mukaan 30 minuutilla. Kasvavat purku- ja lastausajat ovat seurausta siitä, että osastoitu autokansi voidaan täyttää vain osasto kerrallaan, joko aluksen keula- tai peräosasta alkaen. Aikaa kuluu, kun lastin aiheuttama viippaus kompensoidaan painolastitankkeja käyttäen. Ilman viippauksen kompensointia autoramppien nousukulmat saattavat ylittää asetetut raja-arvot, jolloin on vaara ajoneuvon ei-toivotusta osumisesta aluksen rakenteisiin. Aikataulun ajaminen kiinni nopeutta

nostamalla näkyy suoraan polttoaineen kulutuksessa, joka tutkimuksessa kasvoi lähes 10% osastoimattomaan versioon verrattuna. Lisäksi kuluja muodostuu osastointiin tarvittavien vesitiiviiden ovien hankintahinnasta sekä niiden kunnossapitokuluista. Lisäksi ovien vaatiman tilan myötä menetetään osa aluksen lastikapasiteetista. Tutkimusprojekteissa ei käsitelty vaihtoehtoa, jossa aluksen aikataulu sopeutetaan osastoidun autokannen vaatimaan pidempään lastinkäsittelyaikaan. [32]

Vesitiiviin osastoinnin optimointi

Aluksen vesitiiviissä osastoinnissa joudutaan yleensä tekemään kompromisseja osastoinnin saavuttaman A-indeksin sekä rakenteiden, laitteistojen, varastotilojen ja käytettävyyden asettamien vaatimusten välillä. Joissain tapauksissa on mahdollista kasvattaa aluksen A-indeksiä poikittaisten vesitiiviiden laipioiden määrää ja sijoittelua muuttamalla. Lisäksi A-indeksiä saattaa olla mahdollista kasvattaa pitkittäisten laipioiden (ns. B/5 laipiot) paikkaa ja suuntausta muuttamalla. Tutkimuksissa optimoinnilla saavutettiin 1-2 % lisäys A-indeksiin. [32]

Kaksoisrunko autokannella

Kaksoisrunko autokannella voidaan toteuttaa rakentamalla kehyskaarien varaama tila autokannella umpinaiseksi. Tällöin vuototilanteessa autokannen kaksoisrunko tarjoaa lisää uppouman nostovoimaa etenkin suuremmilla kallistuskulmilla, mikä kasvattaa suurinta oikaisevaa momenttivartta GZ_{max} . Lisäksi verrattuna tavanomaiseen ratkaisuun, on kaksoisrunkoa vasten kerääntyvä vesi lähempänä aluksen keskilinjaa, jolloin vuotoveden kallistava momentti jää pienemmäksi. Mikäli kaksoisrunko muodostaa alukselle sivukapit ja keskikapista luovutaan, on aluksella suurempi todennäköisyys selviytyä vauriosta kuin keskikapillisella aluksella. [15], [30], [32] & [33]

Vuodontausjärjestelyt

Vuodontausjärjestelmien (engl. cross flooding) tarkoituksena on ehkäistä epäsymmetrinen vuoto ja siten vähentää aluksen kallistuskulmaa vuototilanteessa. Tämä toteutetaan sallimalla veden virtaaminen myös vuotoaukon vastakkaisella puolella olevaan, tyhjään osastoon. Käytännössä tämä toteutetaan osastot yhdistävillä putkilla tai kaksoispohjassa pituusköleihin tehdyillä vuodontausaukoilla. Pienemmällä kallistuskulmalla aluksen jäännösvaralaita on suurempi, minkä on havaittu vähentävän autokannelle kertyvän veden määrää. Vuodontausjärjestelyillä lisäys A-indeksiin ja vuotovakavuuteen saavutetaan varsin pienellä vaikutuksella aluksen elinkaarikustannuksin. [32]

Painopisteen alentaminen

Pienillä vaihtokeskuskorkeuksilla mallien havaittiin olevan taipumusta kallistua vaurion puolelle [33]. Painopistettä alentamalla aluksen vaihtokeskuskorkeus alenee, jolloin edellä mainittu taipumus vähenee. Käytännössä aluksen painopisteen alentaminen tarkoittaa kansirakennuksen pienentämistä tai lastikapasiteetin rajoittamista, mikä ei ole kustannustehokasta. [31]

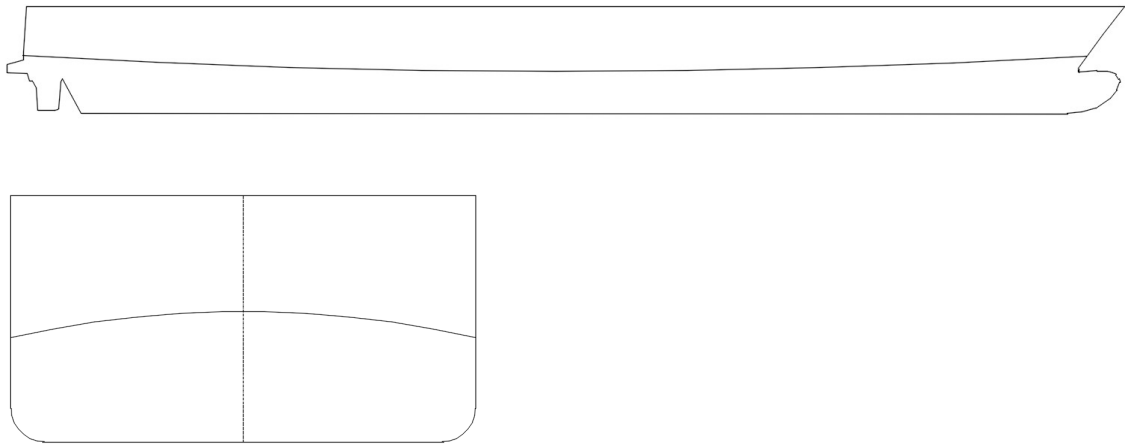
Autokannen ketka ja mutka

Autokannen ketka (engl. sheer) tarkoittaa sitä, että autokansi rakennetaan pituussuunnassa kaarevaksi. Positiivisella ketkalla autokansi on keskilaivassa alempana kuin perä- ja

keulalaivassa. Negatiivisella ketkalla tilanne on päinvastoin. Autokannen mutka (engl. camber) tarkoittaa vastaavasti autokannen kaarevuutta aluksen laidalta toiselle. Positiivisella mutkalla kansi on aluksen keskilinjalla korkeammalla kuin laidoilla (eli päinvastoin kuin sheer).

Yhdistelmällä PSPC (positive sheer and positive camber) on tarkoitus vaikeuttaa ja hidastaa veden sisään virtaamista ja helpottaa veden ulosvirtaamista, ja siten vähentää autokannelle kertyvän veden määrää. Lisäksi järjestely kasvattaa todennäköisyyttä veden kertymiselle aluksen ehjälle puolelle, jolloin vaurion puoleinen jäännösvaralaita kasvaa kallistuksen kasvaessa, jolloin myös veden sisäänvirtaus hidastuu. Positiivinen autokannen ketka ja mutka on esitetty kuvassa 9.

Yhdistelmällä NCNS, (negative camber and negative sheer) on tarkoitus vähentää sisään kertyvän veden kallistavaa momenttia ohjaamalla kannelle päässyt vesi aluksen keskilinjalle, aluksen perään ja keulaan. Lisäksi negatiivisella mutkalla jäännösvaralaita erityisesti keskilaivassa on suurempi, vähentäen veden sisään virtausta verrattuna tavanomaisella suoralla kannella varustettuun alukseen. [31]



Kuva 9. Autokannen positiivinen ketka ja mutka PSPC.

Pallekölit

Palleköleillä tarkoitetaan laivan pituussuunnassa pitkiä, palteen seudulle kiinteästi asennettuja kölejä. Niillä saadaan vaimennettua aluksen keinumista aallokossa. Mallikokeissa havaittiin pallekölien vähentävän autokannelle tulevan veden määrää. Selityksenä tälle on se, että aluksen suhteellinen keinumisliike aaltoon nähden pienenee. Tämän seurauksena autokannen reunan ja aallonhuipun välinen korkeusero pienenee, jolloin aaltojen mukana tulee vähemmän vettä sisään aluksen autokannelle. [33]

Haittapuolena palleköleissä on, että ne lisäävät aluksen kulkuvastusta, mikä näkyy kasvaneena polttoaineenkulutuksena ja heikentyneenä suorituskykynä. Lisäksi pallekölejä ei huomioida vuotovakavuussäännöissä, jolloin niistä ei saada laskennallista hyötyä A-indeksiin tai Tukholman sopimuksen täyttämiseen. [33]

Vedenpoistoaukot autokannen laidoilla

Vedenpoistoaukkojen tarkoituksena on mahdollistaa aluksen autokannelle päätyneen veden virtaaminen takaisin mereen. Vedenpoistoaukot, jotka olivat varustettu vain ulospäin

suuntautuvan virtauksen sallivaksi, havaittiin mallikokeissa tehokkaaksi tavaksi parantaa aluksen selviytymiskykyä vettä kannella -tilanteissa. Testattu alus kykeni selviytymään 4 metrin merkitsevällä aallonkorkeudella, vaikka jäännösvaralaita vähennettiin yhteen metriin. Vedenpoistoaukkojen tehokkuutta pystyttiin parantamaan poistamalla mallista keskikappi, jolloin vesi pääsee vapaammin virtaamaan aluksen laidalta toiselle ja poistumaan vastapuolen poistoaukoista. Lisäksi vaurion vastakkaiselle puolelle virtaavan veden aiheuttama kallistus kasvattaa efektiivistä jäännösvaralaitaa, jolloin veden sisäänvirtaama autokannelle pienenee. Vedenpoistoaukkojen tehokkuus heikkeni merkityksettömäksi tapauksissa, joissa jäännösvaralaidan korkeus oli alle 1,0 metriä. [13], [33] & [34]

4.3 Turvallisuus- ja riskianalyysi FSA

Turvallisuustasoa määritettäessä on selvitettävä tarkasti, että kuinka turvallinen on lopulta riittävän turvallinen. Oikean turvallisuustason määrittäminen merikuljetuksissa on haastava tehtävä, sillä turvallisuuteen vaikuttava sääntely vaikuttaa välillisesti myös laivaliikenteen kustannustasoon. Mikäli kustannustaso nousee liian korkeaksi ja merikuljetuksille löytyy vaihtoehtoja, on mahdollista, että asiakkaat hakeutuvat näihin kilpaileviin kuljetusmuotoihin. Sama vaikutus on myös liian korkealla riskitasolla, jolloin matkustajat ja lastit siirtyvät johonkin toiseen, turvallisempaan vaihtoehtoon. Oikein asetetulla sääntelyllä saavutetaan optimaalinen tilanne liikenteen kokonaisriskin, ympäristölle aiheutuvan kuormituksen ja kustannusten välillä.

IMO:ssa on otettu käyttöön sääntelyä koskevan päätöksenteon tueksi ja työkaluksi FSA, Formal Safety Assessment, eli turvallisuus ja riskianalyysi. FSA:n tavoitteena on tutkia päätöksenteon kohteena olevan toiminnan yksilöön, yhteiskuntaan ja ympäristöön kohdistamaa riskiä riskianalyysin ja vaihtoehtojen kustannustehokkuuden arvioinnin keinoin.[35]

FSA:ssa kartoitetaan toimintaan mahdollisesti liittyvät uhat ja tarkastellaan niiden merkittävyys esiintymistiheydellä ja seurauksilla arvioituna. Merkittävimmät uhat tutkitaan tarkemmin esimerkiksi riskimalleilla, jotka kuvaavat uhan toteutumiseen vaikuttavien tapahtumien todennäköisyyttä ja syy-seuraus-suhteet. Tämän jälkeen etsitään erilaisia ratkaisumalleja, joilla uhkaa voidaan rajoittaa. Näiden tehokkuus arvioidaan sisällyttämällä ne riskimalliin ja laskemalla niiden uhkaa vähentävä vaikutus. Lisäksi tehdään kustannus-hyöty-analyysi, jolla arvioidaan ratkaisumallien odotusarvo aluksen elinkaaren aikana sekä kustannustehokkuusanalyysi, jolla arvioidaan ratkaisumallilla potentiaalisesti säästetyn yhden ihmishengen hinta. Näistä saadaan laskettua ratkaisumallin GCAF ja NCAF-arvot (engl. Gross/Net Cost of Averting Fatality), joilla erilaisia ratkaisumalleja voidaan vertailla keskenään. Arvioitaessa ympäristöön kohdistuvaa uhkaa, voidaan mittana käyttää säästetyn ihmishengen sijaan jotain muuta relevanttia mittaa, esimerkiksi potentiaalisesti vältettyä öljyvuototonnaa. Kaikkien edellisten vaiheiden pohjalta tehdään tarvittaessa suositus siitä, miten sääntelyä tulisi muuttaa, jotta oikea riskitaso saavutetaan.

Oikeaa riskitasoa arvioidaan riskianalyysissä jakamalla riskin määrän mukaan kolmeen eri alueeseen: Alimman riskitason muodostaa ns. siedettävä riski, jonka toteutumisen todennäköisyys on häviävän pieni ja/tai seuraukset lievät, jolloin riskin pienentämiseksi ei ole tarpeellista. Korkeimman riskitason muodostaa taas ns. ei-siedettävä riski, jonka toteutumisen todennäköisyys on suuri ja/tai seuraukset ovat vakavat. Tällä riskitasolla tulee toteuttaa välttämättömät, riittävät toimenpiteet, joilla riskitasoa saadaan pienennettyä.

Edellä mainittujen kahden alueen väliin jää ns. ALARP-alue, jossa riskiä tulee vähentää niin matalaksi kuin vaan on käytännöllistä, kustannustehokkuuskriteereillä mitattuna.

Ihmisten näkemykset siitä, mitkä ovat siedettävän ja ei-siedettävän riskin rajat vaihtelevat voimakkaasti yksilöstä ja suoritettavasta riskin alaisesta aktiviteetista ja siitä saatavasta hyödystä riippuen. Yleisesti ihmiset ovat valmiita hyväksymään suurempia riskejä ollessaan itse vastuussa toiminnasta, esim autoillessaan tai urheillessaan. Sen sijaan, mikäli yksilöön kohdistuu riskin alaista toimintaa, johon yksilö ei näe mahdollisuutta suoraan vaikuttaa, on siedettävän riskin taso matalammalla. Esimerkki tällaisesta toiminnasta on julkinen liikenne, johon myös matkustaja-alusliikenne katsotaan kuuluvan. Matkustaja-alusliikenteessä matkustajiin kohdistuvan riskin rajoiksi IMO suosittaa seuraavien ALARP-alueen rajojen käyttämistä yksilöön kohdistuvan riskin rajoittamiseksi: [36]

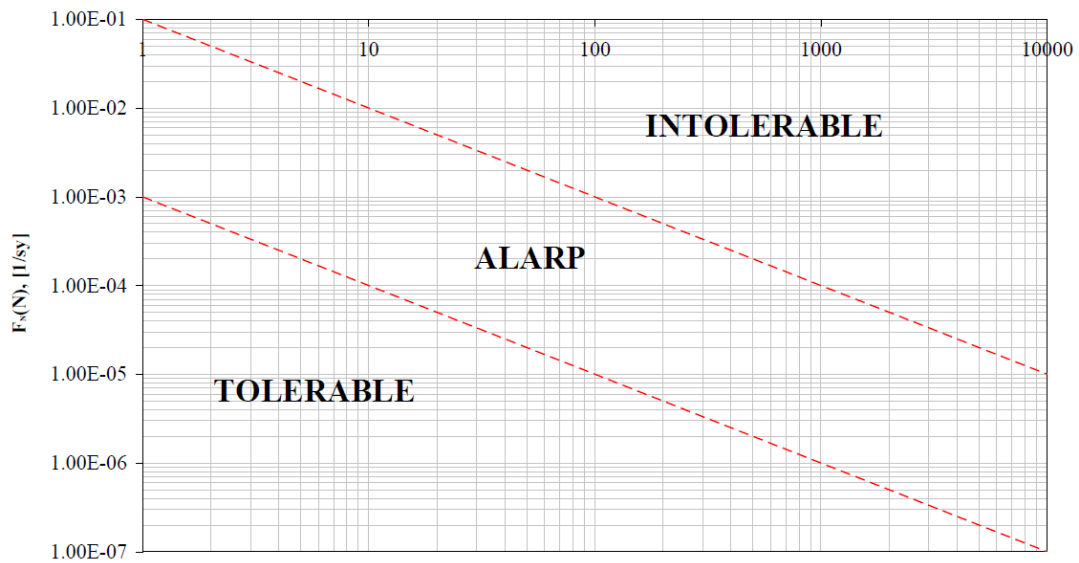
Siedettävä riski: 10^{-6} kuolemantapausta laivavuotta kohden

Ei-siedettävä riski: 10^{-4} kuolemantapausta laivavuotta kohden

Siedettävän riskin rajalla yksilön olisi teoriassa matkustettava keskimäärin miljoona vuotta aluksella joutuakseen kuolemaan johtavan onnettomuuden. Koska onnettomuudet voivat kuoleman sijaan johtaa myös loukkaantumiseen, on näiden välille asettua seuraavat vastaavuussuhteet: 10 vakavaa loukkaantumista vastaa yhtä kuolemaa ja 10 loukkaantumista vastaa yhtä vakavaa loukkaantumista. Lievät loukkaantumiset jätetään kokonaan huomioimatta.

Useaan ihmiseen samanaikaisesti vaikuttavasta riskistä käytetään termiä 'yhteiskuntaan kohdistuva riski'. Tällöin riskikriteerien tarkoitus on rajoittaa erityisesti suuronnettomuuksien todennäköisyyttä, sillä yleisesti yhteiskunnan näkökulmasta yksi onnettomuus, jonka seurauksena on tuhat kuolemantapausta, on vakavampi tapahtuma kuin tuhat onnettomuutta, jotka aiheuttavat yhden henkilön kuoleman [37]. Lisäksi riskikriteerejä määritettäessä voidaan ottaa huomioon riskinalaisen toiminnan taloudellinen tärkeys yhteiskunnalle, sekä arvioida menetettyjen ihmishenkien merkitystä kansantuotteelle. Vaihtoehtoisesti voidaan arvioida riskin ja kuljetussuoritteen suhdetta.

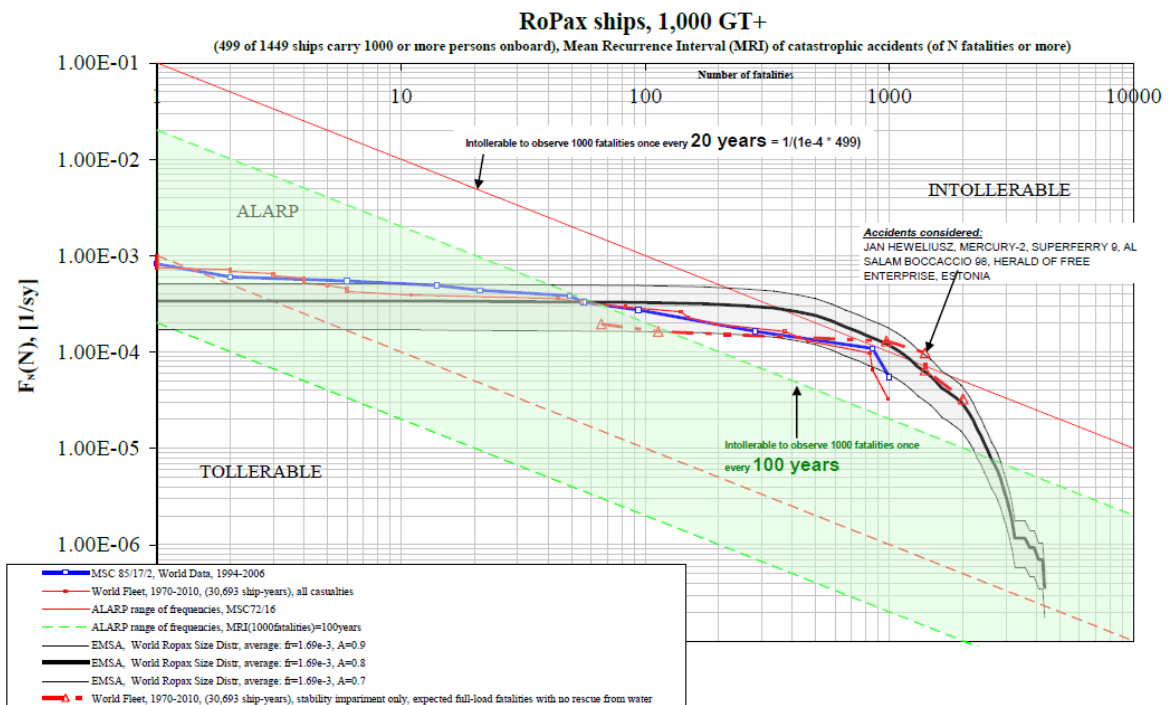
Yhteiskuntaan kohdistuvaa riskiä ja riskikriteerejä voidaan havainnollistaa FN-kaaviolla, josta on esitetty esimerkki kuvassa 10. Kaaviossa pystyakselilla on kuvattu onnettomuuksien esiintymistiheys (onnettomuuksia/aikajakso) ja vaaka-akselilla onnettomuuden seurauksena menehtyneiden lukumäärä. Kuvaajassa voidaan samassa yhteydessä esittää myös ALARP-alueen rajat.



Kuva 10. FN-kaavio, jossa on esitetty IMO:n nykyiset ALARP-rajat. [36]

4.4 Tavoitteeksi suuronnettomuus enintään sadan vuoden välein

EMSA 2 tutkimuksessa otettiin tarkasteluun IMO:n asettamia riskikriteerejä. Niiden mukaisesti hyväksyttävän riskin rajana on, että 1000 henkeä vaativa onnettomuus saa keskimäärin tapahtua kerran 10000 vuodessa matkustaja-alusta kohden. Maailmassa oli tutkimuksen teon aikaan kaupallisessa liikenteessä 499 matkustaja-autolauttaa, joissa matkustajakapasiteetti on 1000 henkeä tai enemmän. Tällöin laskennallinen keskimääräinen esiintymistiheys 1000 henkeä vaativalle onnettomuudelle on kerran 20 vuodessa. Onnettomuustiheyden laskennassa oletetaan, että kaikki matkustaja-autolautat täyttävät Solas 2009 vuotovakavuussäännön ilman marginaalia, eli $A=R$. Matkustaja-autolautoille tapahtuneita onnettomuuksia suhteessa riskikriteereihin on havainnollistettu kuvassa 11.



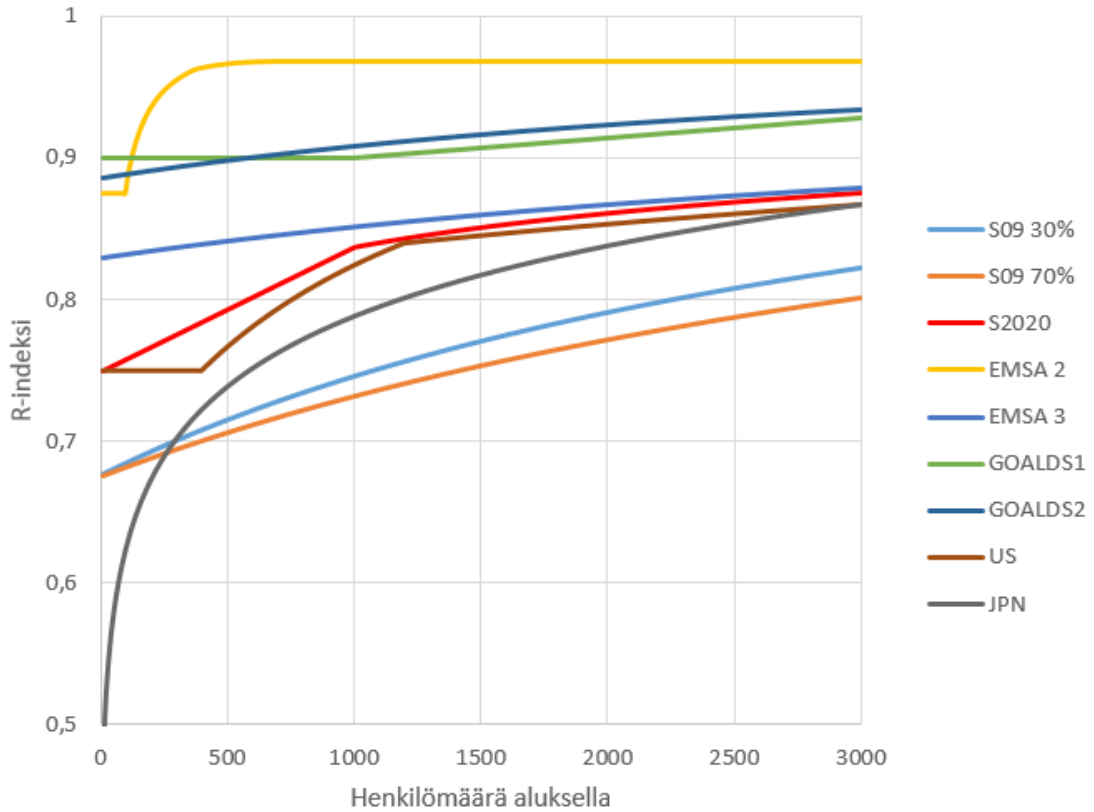
Kuva 11. Matkustaja-autolautoille tapahtuneet onnettomuudet ja ehdotetut ALARP-alueen rajat. [1]

Onnettomuustilastoja tutkittaessa havaittiin, että vakavia matkustaja-autolautojen kaatumisia on tapahtunut noin kymmenen vuoden välein. Kaatumistapausten lisäksi matkustaja-autolautoille on tapahtunut muutamia läheltä piti -tilanteita. Vaikka onnettomuuden laukaiseva tekijä (keulaluukun rakenteelliset tai operatiiviset virheet, sammutusveden kertyminen autokannelle) on eri tapauksissa erilainen, oltaisiin ihmishenkien menetykseltä todennäköisesti välttytty, mikäli aluksella olisi ollut parempi vuotovakavuus. [1]

EMSA 2 tutkimuksessa ehdotetaan riskikriteerien tiukentamista siten, että 1000 henkeä vaativa onnettomuus voidaan hyväksyä tapahtuvaksi kerran 100 vuodessa, eli alusta kohden kerran 200 000 vuodessa. Tavoite saavutettaisiin R-indeksin laskentakaavaa muuttamalla.

4.5 Esitetyt vaihtoehdot R- ja A-indeksille

Uuden R-indeksin päättäminen ei ollut yksioikoinen tehtävä, sillä eri laiva-alan toimijoilla oli toisistaan poikkeavia näkemyksiä, miten indeksi pitäisi laskea. R-indeksille ehdotettiin useita erilaisia laskentakaavoja, jotka esitetään seuraavaksi. Esitetyissä yhtälöissä N_{\max} on aluksen suurin sallittu henkilömäärä. Kuvassa 12 on esitetty, miten nämä eri tutkimusten ja IMO:n jäsenvaltioiden merenkulun turvallisuuskomitean kokouksissa esittämät vaihtoehtoiset R-indeksit käyttäytyvät suurimman hyväksytyn henkilöluvun funktiona.



Kuva 12. IMO:lle ehdotetut vaihtoehtoiset R-indeksit verrattuna Solas 2009 R-indeksiin.

EMSA 2 tutkimusraportti esitti seuraavaa mallia R-indeksin laskemiseksi:

$$\begin{aligned}
 R(N_{max}) &\geq 0,875 \quad \text{kun } N_{max} < 100, \\
 R(N_{max}) &\geq 1 - \frac{1}{0,0845 N_{max} \cdot 36,67 \cdot 10^{-6} \cdot N_{max}^2} \quad \text{kun } 100 \leq N_{max} < 375, \\
 R(N_{max}) &\geq 1 - \frac{1}{0,0845 \cdot N_{max} \cdot e^{-\left(\frac{N_{max}-250}{704}\right)}} \quad \text{kun } 375 \leq N_{max} < 704 \text{ ja} \\
 R(N_{max}) &\geq 0,968 \quad \text{kun } N_{max} > 704
 \end{aligned}$$

EMSA 3 tutkimusraportissa R-indeksin laskeminen on muotoiltu seuraavasti:

$$R = 1 - \frac{CI \cdot 6200}{4 N_{max} + 20000},$$

missä $CI = 0,8 - \frac{0,25}{10000} \cdot (10000 - N_{max})$.

GOALDS-projekti ehdotti puolestaan R-indeksiä laskettavaksi seuraavasti:

$$\begin{aligned}
 R &= 0,9 \quad \text{kun } N_{max} < 1000, \\
 R &= 0,9 + \frac{0,07}{5000} \cdot (N_{max} - 1000) \quad \text{kun } 1000 \leq N_{max} < 6000 \text{ ja} \\
 R &= 0,97 \quad \text{kun } N_{max} \geq 6000
 \end{aligned}$$

Toinen GOALDS-projektin esittämä vaihtoehto on

$$R = 1 - \frac{2300}{5 \cdot N_{max} + 20000}$$

Yhdysvaltojen ehdotus R-indeksiksi on seuraava:

$$R = 0,75 \quad \text{kun} \quad N_{max} \leq 400 \quad ,$$

$$R = 1 - \frac{355,5}{N_{max} + 1022} \quad \text{kun} \quad 400 < N_{max} \leq 1200 \quad \text{ja}$$

$$R = 1 - \frac{1410}{N_{max} + 7610} \quad \text{kun} \quad N_{max} > 1200$$

Japani esitti SDC 3 kokouksessa R-indeksiä laskettavaksi seuraavasti:

$$R = 0,0719 \cdot \ln N_{max} + 0,291$$

A-indeksistä esitettiin kokouksessa SLF 51 malli, jossa s-kertoimen kriteerejä kasvatetaan kaikissa vauriotapauksissa, jossa vaurio yltää autokannelle. Näissä vaativammissa kriteereissä GZmax-tavoite on 0,20 metriä ja positiivinen vakavuuslaajuustavoite 20 astetta. Tämä malli otettiin mukaan osaksi Solas 2020 vuotovakavuussääntöä.

4.6 SOLAS 2020 – Kompromissiratkaisu

Vuonna 2016 pidetyssä SDC:n kolmannessa kokouksessa muodostetulle työryhmälle asetettiin tehtäväksi etsiä toimiva ratkaisu siihen, miten R-indeksi laskettaisiin jatkossa. Edellisessä kappaleessa esitettyjen ehdotusten lisäksi työryhmä tutustui BMVI:n ja DMA:n tekemiin tutkimuksiin, joissa tarkasteltiin vuotovakavuussääntöjen soveltamista erikoisaluksille sekä pienille matkustaja-aluksille. Lisäksi Japanin valtio ilmaisi kokouksessa huolensa sääntömuutoksen vaikutuksesta pienten matkustaja-autolautojen suunnitteluun ja esitti oman ehdotuksensa R-indeksin laskemiseen. [38]

Saksan liikenteen ja digitaalisen viestinnän ministeriön BMVI:n ja saksalaisten telakkayhtiöiden yhteistyönä tehdyssä tutkimuksessa selvitettiin R-indeksin nostamisen vaikutusta pienten matkustaja-alusten sekä erikoisalusten ja suurten huvijachtien elinkaaren aikaisiin kustannuksiin. Tutkimuksessa aluksille asetettiin tavoitteellinen R-indeksin arvo, joka asettui Solas 2009 säännön ja Goalds-projektin mukaisien R-indeksien puoleen väliin. Tutkimuksen yhteydessä ei onnistuttu löytämään IMO:n kustannustehokkuusrajojen sisällä pysyviä ratkaisuja, joilla matkustaja-aluksen A-indeksi olisi saatu nostettua Goalds-projektin ehdottamalle tasolle. Tutkimuksen itselleen asettama R-indeksitavoite onnistuttiin kustannustehokkaasti saavuttamaan matkustaja-autolautalla, sekä saariston huolto- ja matkustajaliikenteeseen suunnitelluilla matkustaja-tavara-lautoilla. Muilla tutkituilla alustyypeillä tutkimuksen asettamaa R-indeksitavoitetta ei onnistuttu saavuttamaan kustannustehokkaasti. [39]

Tanskan merenkulkuvirasto DMA teki tutkimuksen, jossa selvitettiin Tanskan saaristoliikenteessä tyypillisten pienten matkustaja-autolautojen vuotovakavuutta. Tutkitut alukset olivat eri vuosikymmeniltä ja niiden suunnittelussa on sovellettu rakennusaikaista vuotovakavuussääntöä. Jotta aluksia voitaisiin verrata toisiinsa, päädyttiin tutkimuksessa vertailemaan alusten vakavuuden GM-rajakäyrien ja eri lastitilanteiden välisiä

marginaaleja. Alusten suurin teoreettinen A-indeksin arvo määriteltiin nostamalla GM-rajakäyrää ensimmäisen rajoittavan lastitilanteen tasolle. Havaintona oli, että osa vanhemmista aluksista ei saavuttanut Solas 2009 R-indeksiä aikaisempien vuotovakavuussääntöjen mukaisilla GM-rajoituksilla. Lisäksi SLF51 mukaisten kriteerien käyttäminen s-kertoimelle pienensi A-indeksiä 3-12%, mikä on merkittävästi suurempi kuin muissa tutkimuksissa isommilla matkustaja-autolautoilla havaittu 1-3% pienentyminen. [40]

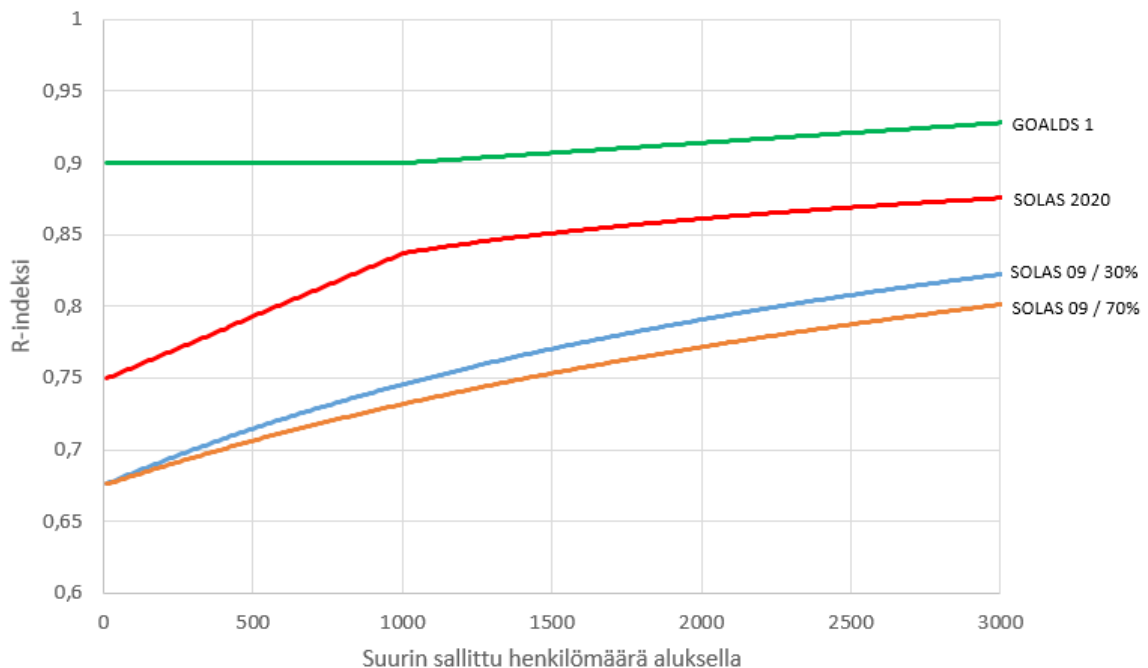
SDC:n kolmannen kokouksen työryhmä muodosti aineiston pohjalta kompromissiehdotuksen, jonka IMO:n jäsenvaltiot pystyivät hyväksymään. Ehdotettu R-indeksi asettuu Solas 2009 ja Goals R-indeksien puoleenväliin lähestyen EMSA:n korkeampaa ehdotusta [4]. Tämä on esitetty kuvassa 13. Lisäksi aikaisemmin pidetyssä SLF51 kokouksessa esille tuotu ehdotus s-kertoimen kriteereiksi tilanteissa, joissa vaurio kohdistuu autokannelle, säilytettiin edelleen sääntöehdotuksessa. Sääntöehdotuksen mukaan laskennassa ei enää tehdä eroa henkilömäärän osalta siitä kuinka suurelle määrälle on varattu pelastusvenepaikka ja kuinka monelle pelastuslauttapaikka. Tällä otetaan aikaisempaa paremmin huomioon nykyaikaisten pelastautumisjärjestelmien (MES, marine evacuation system) tehokkuus ja nopeus aluksen evakuoinnissa. MES-järjestelmä perustuu pelastuslauttoihin, sekä liukurataan jota pitkin lauttoihin siirrytään. Järjestelmä muistuttaa toiminnallisuudeltaan hyvin paljon matkustajalentokoneissa käytettävää pelastautumisjärjestelmää.

Uusi ehdotettu R-indeksi on seuraava [38]:

$$R = 0,0000088 \cdot N_{max} + 0,7488 \quad \text{kun } N \leq 1000 ,$$

$$R = 0,0369 \cdot \ln(N_{max} + 89,048) + 0,579 \quad \text{kun } 1000 < N_{max} \leq 6000 \text{ ja}$$

$$R = 1 - \frac{CI \cdot 6200}{4 \cdot N_{max} + 20000} \quad \text{kun } N > 6000 \text{ ja } CI = 0,8 - \frac{0,25}{10000} \cdot (10000 - N)$$

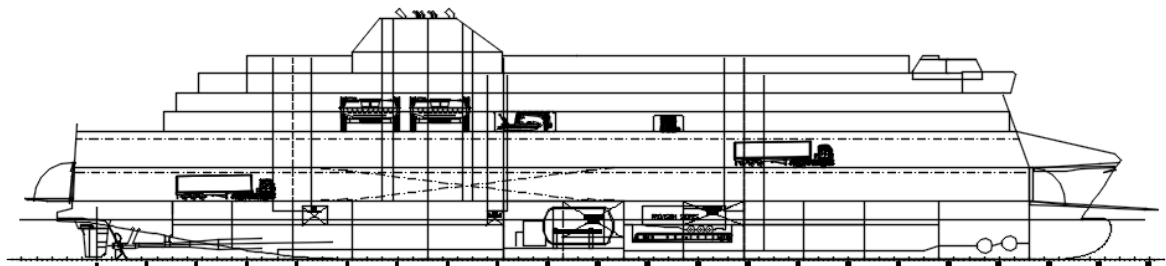


Kuva 13. Solas 2020 R-indeksi verrattuna nykyiseen Solas 2009 sekä GOALDS-projektin ehdottamaan R-indeksiin.

5 Tapaustutkimus

5.1 Tutkittavan aluksen esittely

Tässä työssä tutkittava alus on lyhyeen, toiminta-alueeltaan rajoittamattomaan kansainväliseen liikenteeseen soveltuva matkustaja-autolautta. Aluksen tehtävänä on aikataulun mukainen liikenne kahden Itämerellä sijaitsevan sataman välillä. Aluksen yleisjärjestelyä on esitetty kuvassa 14 ja liitteessä 1. Aluksen päämitat on esitetty taulukossa 1. Kyseinen laiva valittiin tarkasteltavaksi, sillä se edustaa nykyaikaista Itämerelle soveltuvaa matkustaja-autolauttaa ja lisäksi se poikkeaa riittävästi aikaisemmissa tutkimuksissa käytetyistä aluksista.



Kuva 14. Sivukuva aluksen yleisjärjestelystä.

Taulukko 1. Aluksen päämitat

Symboli	Arvo	Yksikkö	Selitys
Loa	169,9	m	Suurin pituus
Lpp	157,2	m	Luotiviivapituus
B	27,8	m	Leveys
T	6,4	m	Syväys
Disp	18000	ton	Uppouma
v	23	kn	Nopeus
GT	33000	-	Vetoisuus
LM	1700	m	Kaistametr

Lastina aluksella on pyöräkuormaa, eli kuorma-autoja, perävaunuja sekä linja- ja henkilöautoja, sijoitettuna kansille 3 ja 5. Alus on läpiajettava, eli satamassa lastaus ja purkaminen tapahtuvat perä- tai keularampin kautta. Kansien välillä siirtyminen tapahtuu leveää kiinteää ajoramppia pitkin, joka on sijoitettuna keskilaivaan, aluksen oikealle sivulle.

Matkustajille aluksella on tarjolla ravintola-, myymälä- ja oleskelutilat kansirakennuksessa kansilla 7,8 ja 9. Hyttikapasiteettia on varattuna aluksen henkilökunnalle sekä satunnaisille aluksella yöpyville matkustajille. Aluksen kulutustavaravarasto on sijoitettu kannelle 2, aluksen keskivaiheille.

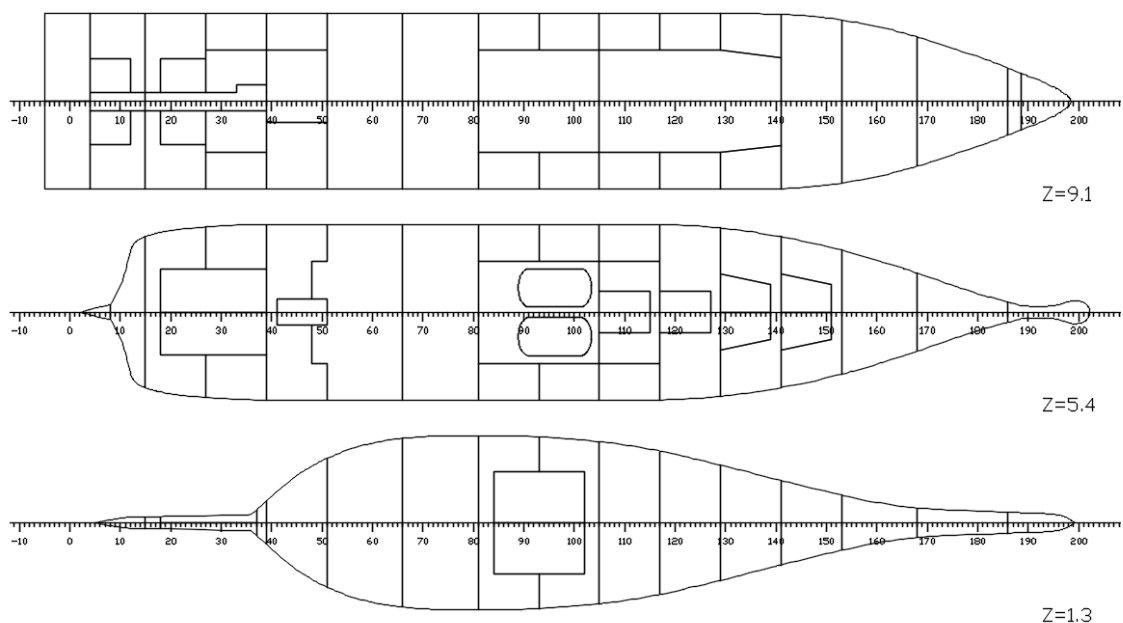
Kuljetuskoneiston muodostavat neljä keskinopeaa dual fuel dieselmoottoria, joiden pääasiallisena polttoaineena käytetään nesteytettyä maakaasua, LNG:tä. Pilotti- ja varapolttoaineena aluksella on kevyt polttoöljy. LNG polttoainetankit on sijoitettu konehuoneen keulapuolella sijaitsevaan osastoon, kahteen suureen c-tyyppin LNG-säiliöön.

Polttoöljytankit on sijoitettu osastoihinsa LNG säiliötilan etupuolelle, kulutustarvikevaraston alapuolelle. Moottorit on jaettu SRtP-vaatimusten mukaisesti kahteen palo- ja vesitiiviisti erotettuun konehuoneeseen. Moottoreiden teho välitetään kahdelle säädettäväsiipiselle potkurille perinteisillä mekaanisilla akselijohdoilla.

5.2 NAPA-malli

NAPA, Naval Architectural Package, on suomalaisvalmisteinen moduulirakenteinen ohjelmistopaketti, joka on laajalti telakoiden ja suunnittelutoimistojen käytössä ympäri maailmaa. Ohjelmiston avulla pystyy esimerkiksi määrittämään ja laskemaan aluksen geometrian, hydrostaattiset ja hydrodynaamiset ominaisuudet sekä teräsrakenteen ominaisuudet. Työssä käytetään ohjelmiston geometry, loading conditions ja damage stability moduuleja.

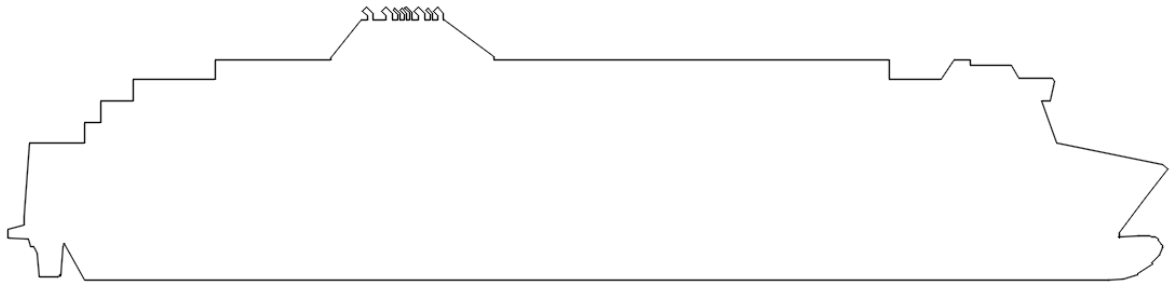
Tässä tutkimuksessa ohjelmistolla määriteltiin aluksen runkomuoto ja rungon sisäpuolinen tilajärjestely kannelle 7 asti. Tilajärjestelyssä on määritelty rungon sisäpuoliset tilat siten, että ne kuvaavat kaikki vuotoa rajoittavat vesitiiviit rajapinnat. Tilajärjestelyn suunnittelun tavoitteena on, että alus saavuttaa vähintään 3% marginaalilla Solas 2020 mukaisen R-indeksin 2000 henkilöllä. Lisäksi aluksen tulisi täyttää samanaikaisesti Tukholman sopimuksen mukainen vettä kannella -sääntö. Tavoitteen täyttämiseksi huomiota kiinnitettiin erityisesti epäsymmetrisen vuodon minimointiin sekä B/5 pitkittäislaipioiden hyödyntämiseen vuodon rajoittamisessa ja vajoaman pienentämisessä. Tutkimuksen vertailu- ja lähtökohtana toimii malli, jossa autokansi on määritelty 9,3 metriä aluksen perustason yläpuolelle. Aluksen yleisjärjestely ja tilat on esitetty liitteessä 1 ja 2. Kuvassa 15 on esitetty aluksen autokannen alapuolinen vesitiivis osastointi.



Kuva 15. Aluksen vesitiivis osastointi NAPA-mallissa. Perästä laskien viidennessä osastossa havaittava epäsymmetria poistettiin lisäämällä ei-vesitiiviit ovet pitkittäisiin laipioihin.

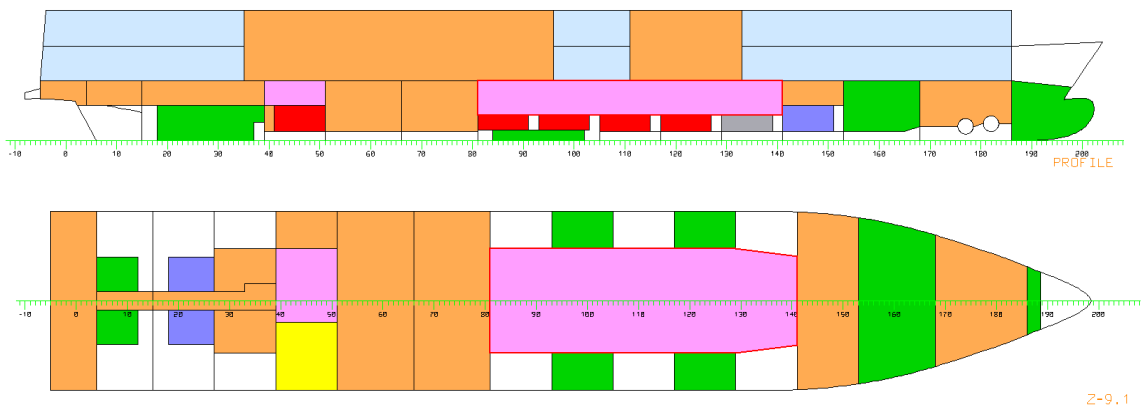
Ulokkeita, kuten potkuriakseleita, hylsäputkea kannakkeineen ja peräsimiä ei mallinnettu. Keulapotkuritunnelit on huomioitu mallissa. Tuulimomentin laskentaa varten NAPA-malliin lisättiin käyrä, jonka rajaama pinta-ala ja painopistepaikka kuvaavat riittävällä

tarkkuudella tarkasteltavan aluksen kansirakennusta. Aluksen tuulipinta-ala on esitetty kuvassa 16. Ohjelma laskee todellisen, vedenpinnan yläpuolella olevan pinta-alan aluksen syvyyksen perusteella.



Kuva 16. Tuulipinta-ala NAPA-mallissa.

Aluksesta luotiin tutkittavaksi myös pitkällä autokannen alapuolisella lastiruumalla varustettu LLH-versio. Tässä ratkaisussa lisätilan saamiseksi on luovuttu LNG-tankeista ja korvattu ne matalammilla polttoöljytankeilla. pitkä alalastiruumaa on sijoitettuna konehuoneen keulapuolelle ja sen pituudeksi muodostui 46 metriä. Vapaa korkeus pitkässä alalastiruumassa on 4,6 metriä. Pitkä alalastiruumaa on koko pituudeltaan suojattu B/5 pitkittäislaipioin. Pitkällä alalastiruumalla varustettu malli tarkasteltiin 800 henkilöllä. Pitkän alalastiruuman toteutus yleisjärjestelyssä on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Pitkä alalastiruumaa (LLH) tutkitun aluksen yleisjärjestelyssä.

5.3 Lastitilanteet

NAPA:n Loading conditions -moduulissa aluksen mallille määriteltiin aluksen paino ja painopistepaikka pistemäisenä massana. Autokansien kuorma mallinnettiin autokaistoille tasaisesti jakautuneena kuormana 1,9 tonnia/metri ja kuorman painopisteeksi arvioitiin alemmalla autokannella 2,6 metriä kannen yläpuolella ja 2,0 metriä ylemmällä autokannella sekä pitkässä alalastiruumassa. Rampilla olevan lastin painopiste mallinnettiin 2,0 metriä rampin keskimääräisen korkeuden yläpuolelle. Joustavan käsittelyn mahdollistamiseksi jokainen autokaista mallinnettiin erikseen. Lisäksi malliin määriteltiin muutama varastotila.

Solas 2009 ja 2020 sääntöjen mukaisesti mallille määriteltiin kolme erilaista lastitilannetta, DS, DP ja DL. Lastitilanteissa pyrittiin kuvaamaan todellista tilannetta, jossa autokannet

täytetään alhaalta lähtien ja siten, että painolastivettä joudutaan käyttämään mahdollisimman vähän kallistuksen tai trimmin kompensoimiseksi.

Lastitilanteessa DS alukselle on määritelty täysi lasti autokansille, 200 tonnia LNG:tä ja polttoöljyä ja 100 tonnia juomavettä. Painolastia on määritelty siten, että alus saavuttaa suunnitellun 6,4 metrin syväyksen.

Lastitilanne DP on osalastitilanne, jossa painolastitilanteen DL syväykseen on lisätty 60% lastitilanteiden DL ja DS syväyksien välisestä erosta. Syväys saavutettiin vähentämällä kuormaa ylemmältä lastikannelta. LNG:tä tankeissa on 152 tonnia ja polttoöljyä 377 tonnia. Juomavesitankeissa on vettä 167 tonnia.

Painolastitilanteessa DL aluksella ei ole ollenkaan lastia autokansilla. Kulutettavia nesteitä ja tarvikkeita on jäljellä 10%, eli 60 tonnia LNG:tä ja 56 tonnia polttoöljyä.

Kaikissa lastitilanteissa aluksella on täysi määrä matkustajia ja henkilökuntaa. Lisäksi jokaisessa lastitilanteissa alus on trimmattuna täysin pystyyn ja tasakölille painolastitankkeja hyödyntäen. Nestetankkien osalta vapaan nestepinnan laskennassa käytettiin ohjelman 'all real' menetelmää, joka laskee todellisen vapaan nestepinnan vaikutuksen tankin todellisen geometrian ja nestemäärän mukaisesti. Lastitilanteiden pohjalta lasketut syväykset T ja niitä vastaavat vapaiden nestepintojen vaikutuksella korjatut vaihtokeskuskorkeudet GM on esitelty taulukossa 2.

Taulukko 2. Solas-lastitilanteet

h_maindeck = 9300 ja N=2000		
	T [m]	GM [m]
DS	6,400	2,488
DP	6,004	3,181
DL	5,409	3,216
h_maindeck = 9300 ja N=800		
	T [m]	GM [m]
DS	6,400	2,546
DP	6,004	3,321
DL	5,409	3,289
LLH, h_maindeck = 9300 ja N=800		
	T [m]	GM [m]
DS	6,459	2,638
DP	6,026	3,379
DL	5,337	3,259

Ehjän laivan vakavuussääntöjen [41] täyttyminen tarkastettiin NAPA:n loading conditions -moduulilla. Alus täytti kaikki säännön asettamat kriteerit. Ehjän laivan vakavuuskriteerit on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Ehjän laivan vakavuuskriteerit. [40]

Sääntö	symboli	raja-arvo	ehto
2.2.1	Area30	0,055	<=
2.2.1	Area40	0,090	<=
2.2.1	Area3040	0,03	<=
2.2.2	GZ0.2	0,2	<=
2.2.3	MAXGZ25	25	<=
2.2.4	GM0.15	0,15	<=
2.3.1.2	2008IS-A2.3.1.2	16	>=
2.3.1.4	IMOWEATHER	1	<=
3.1.1	MAXHEELPASS	10	>=
3.1.2	MAXHEELTURN	10	>=

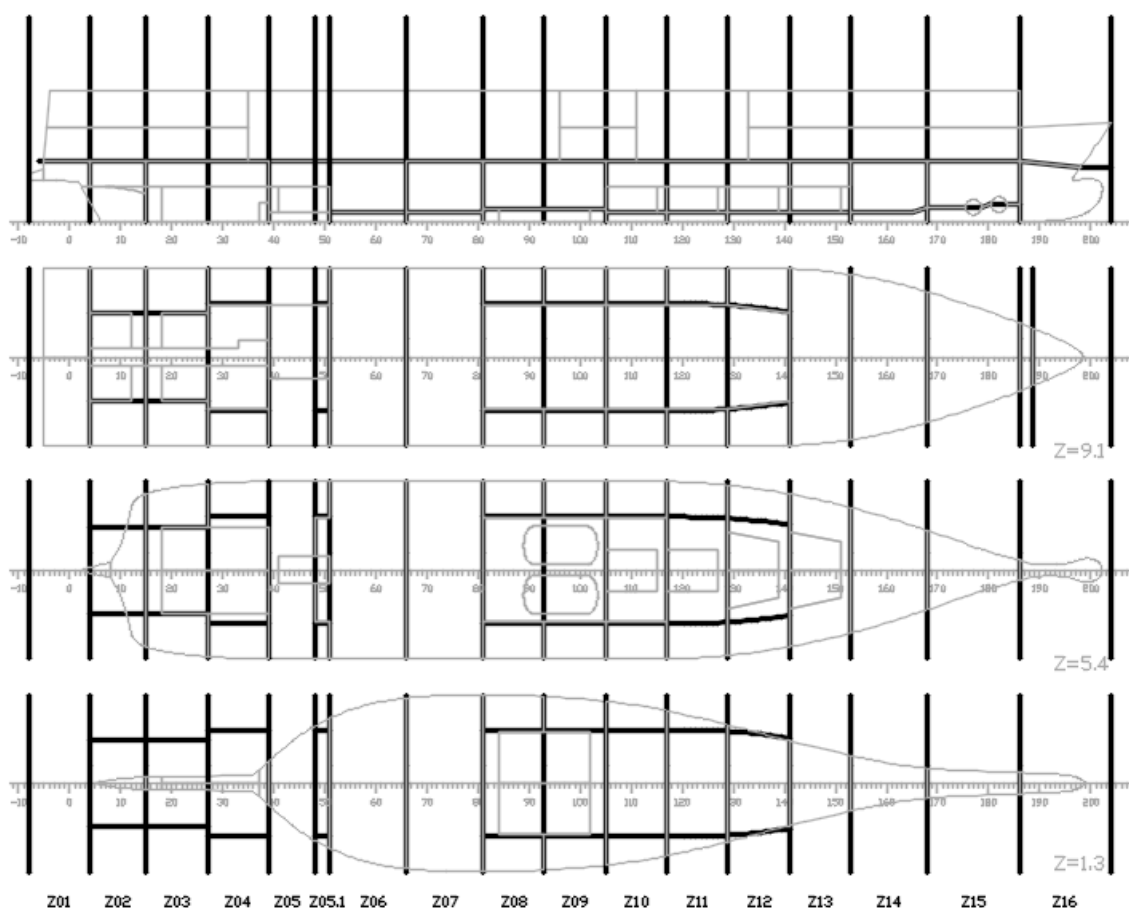
5.4 Vaurioalueet

Malliin määriteltiin vaurioaluetaulukko, jossa on määritelty pinnat, joihin asti rajoitettujen vaurioiden katsotaan yltävän. Rajoitetuilla vaurioilla tarkoitetaan tässä kaikkia niitä vaurioita, jotka ovat pituudeltaan ja tunkeumaltaan pienempiä kuin Solas 2009 ja 2020 probabilististen sääntöjen määrittelemät suurimmat mahdolliset vauriot. Lisäksi ohjelma tekee laskentaa varten automaattisesti B/2 vauriorajoituspinnat, joita pidemmälle vaurio ei tunkeudu. Solas 2009 ja 2020 sääntöjen deterministisen osan pienempiä vaurioita koskevia vauriotapauksia varten käytetään automaattisesti B/10 vauriorajoituspintoja. Vettä kannella -tarkastelua varten ohjelma luo automaattisesti B/5 vauriorajoituspinnan. Laskentaa varten ohjelmalle osoitettiin alempi autokansi lastitilaksi, johon laskennassa lisätään vettä säännön asettamien ehtojen mukaisesti. Aluksen osastointia kuvaavat vauriorajoituspinnat on esitetty kuvassa 18.

Poikittaissuunnassa pinnat on sijoitettu poikittaisten laipioiden tasalle. Taaemman konehuoneen syvennyksen kohdalla pinta on sijoitettu sekä laipion että syvennyksen tasalle. Poikittaissuunnassa määritellyt pinnat jakavat aluksen 17 vaurioalueeseen, zone:en.

Pitkittäissuunnassa pinnat on määritelty painolastitankkien ja B/5 pitkittäislaipioiden tasalle. Taaemman konehuoneen syvennyksen kohdalla sijaitsevalla vaurioalueella vauriota rajoittava pinta on määritelty B/5 laipion tasalle, jotta tälle vaurioalueelle osuvista vauriosta tarkastellaan myös ne tapaukset, joissa vuoto rajoittuu pelkästään taaemman konehuoneen takapuolelle.

Korkeussuunnassa pinnat on asetettu kaksoispohjan ja autokannen tasalle. Näin laskennassa tulee huomioitua myös tapaukset, joissa kaksoispohja säilyy vaurioitumatta. Lisäksi tapaukset, joissa vettä pääsee autokannelle, tulevat erotetuksi tapauksista joissa autokansi säilyy kuivana.



Kuva 18. Vaurioalueet NAPA-mallissa.

5.5 Kriteerit

Probabilistisessa Solas 2009 ja 2020 säännöissä on asetettu kriteerejä, jotka määrittävät s-kertoimen arvon. Kertauksena mainittakoon, että s-kerroin kuvaa todennäköisyyttä välillä 0...1 sille, että alus selviytyy kyseisestä tarkasteltavasta vauriosta. Kriteereille on määritelty tavoitearvot, joiden alittaminen tai ylittäminen voi aiheuttaa s-kertoimen poikkeamisen arvosta 1. Solas 2020 vuotovakavuussäännössä tavoitearvoihin vaikuttaa se, että ylettyykö vaurio autokannelle vai ei. Probabilistisen vuotovakavuusindeksin laskennassa käytettävät kriteerit ja niiden tavoitearvot on esitelty taulukossa 4.

Taulukko 4. Probabilistisen vuotovakavuuslaskennan s-kertoimen kriteerit ja tavoitearvot. [3] & [38]

	S2009	S2020	S2020
Kriteeri	Tavoitearvo	Tavoitearvo, autokansi vaurioituu	Tavoitearvo, autokansi ei vaurioitu
GZmax	0,12	0,20	0,12
Range	16	20	16
Theta_e	15	15	15

Vettä kannella -tarkastelun kriteerit ovat deterministisen Solas 1990 säännön mukaiset:
-Oikaisevan momenttivarren GZ rajaaman pinta-alan tulee olla vähintään 0,015 metri-radiaania.

-Oikaisevan momenttivarren GZ positiivisen laajuuden tulee olla vähintään 15 astetta.

Vaadittavaa laajuutta voi vähentää aina 10 asteeseen asti, mikäli GZ:n rajaama pinta-ala on yhtä suuri tai suurempi kuin $0,015 \cdot 15 / \text{Range}$ [metri-radiaania]

-Oikaisevan momenttivarren GZ suurimman arvon tulee olla vähintään 0,04m+kallistavamomentti/Uppouma, kuitenkin vähintään 0,1 metriä

5.6 Matkustajamäärä ja R-indeksi

Tutkimuksessa selvitettiin matkustajamäärän vaikutusta sääntöjen asettamiin vaatimuksiin jakamalla NAPA-malli kahteen versioon, joista toisessa on 800 henkilöä ja toisessa 2000. Matkustajamäärä otettiin huomioon lastitilanteissa määrittämällä tasaisesti jakautunut massalasti, 75 kg/henkilö, aluksen 8. kannen keskilinjalle.

Matkustajien jakautuminen pelastusveneisiin ja pelastuslauttoihin vaikuttaa merkittävästi Solas 2009 säännön R-indeksiin. Tutkimuksessa jakaumaksi asetettiin 30% pelastusveneisiin ja 70% pelastuslauttoihin, mikä on linjassa muiden tutkimusten kanssa. Solas 2020 säännössä pelastusveneiden ja pelastuslauttojen välisellä suhteella ei ole merkitystä vaan R-indeksi määräytyy kokonaishenkilömäärän perusteella.

Henkilömäärä vaikuttaa kaikissa säännöissä kallistavaan momenttiin. Tämä otettiin huomioon laskennassa. Laskennassa käytettävät R-indeksit on esitelty taulukossa 5.

Taulukko 5. R-indeksit Solas 2009 ja 2020 säännöillä.

N	Solas 2009	Solas 2020
2000	0,79	0,861
800	0,733966	0,81918

NAPA-mallien saavuttamat A indeksit on esitelty taulukossa 6.

Taulukko 6. NAPA-mallien saavuttamat A-indeksit.

Malli	Solas 2009	Solas 2020
N=2000	0,92559	0,91806
N=800	0,93855	0,93034
N=800, LLH	0,93018	0,92239

5.7 Tutkimusmenetelmä

Jotta determinististä vettä kannella-sääntöä ja probabilistista vuotovakavuuslaskentaa voidaan verrata keskenään, käytetään tutkimuksessa ns. minimi-GM-vaatimus-tarkastelutapaa. Tarkoituksena on etsiä pienin GM-arvo, eli suurin painopistekorkeus, jolla alus vielä täyttää tarkasteltavissa vuotovakavuussäännöissä asetetut kriteerit.

Tutkimuksessa autokannen korkeutta lasketaan 50 mm välein alemmaksi, kunnes alus ei enää täytä SOLAS 2020 ja vettä kannella -sääntöä. Lähtötilanteessa autokannen korkeus on 9300 mm perustason yläpuolella. Autokannen laskemisen yhteydessä lastitilanteet

päivitettiin siirtämällä autokansilla sijaitsevaa lastia vastaavasti alaspäin, eli lastin painopisteen korkeus suhteessa autokanteen ei muutu. Lisäksi kallistustankin pohjaa lasketaan alaspäin, jotta sen kapasiteetti ei merkittävästi pienentyisi.

Vettä kannella -säännön laskennassa käytettävää varalaitakäyrää siirrettiin autokannen mukana alaspäin. Aluksen kevytpainon painopistettä, muiden massojen korkeuksia tai tuulipinta-alaa ei muutettu. Jokaiselle autokannen korkeudelle laskettiin GM- ja syväysarvot lastitilanteissa DS, DP ja DL, joita käytettiin lähtötietoina vuotovakavuuslaskennassa. Lähtöarvot on esitetty liitteessä 2.

R-indeksi asetettiin taulukon 5 mukaisiin arvoihin henkilömäärän ja tarkasteltavan säännön mukaisesti.

Aluksen saavuttama A-indeksi laskettiin NAPA-manager-sovelluksen avulla Solas 2009 ja Solas 2020 säännöillä. Samalla sovelluksella laskettiin myös Tukholman sopimuksen mukaiset vettä kannella -tilanteet. Solas 2020 säännöllä laskennassa käytettiin hyödyksi NAPA:n ROROROOM-argumenttia, joka asettaa s-kertoimen laskennassa käytettävät kriteerien tavoitearvot säännön edellyttämällä, taulukon 4. osoittamalla tavalla [42]. Tulokset on esitetty liitteessä 3.

6. Tulokset ja analyysi

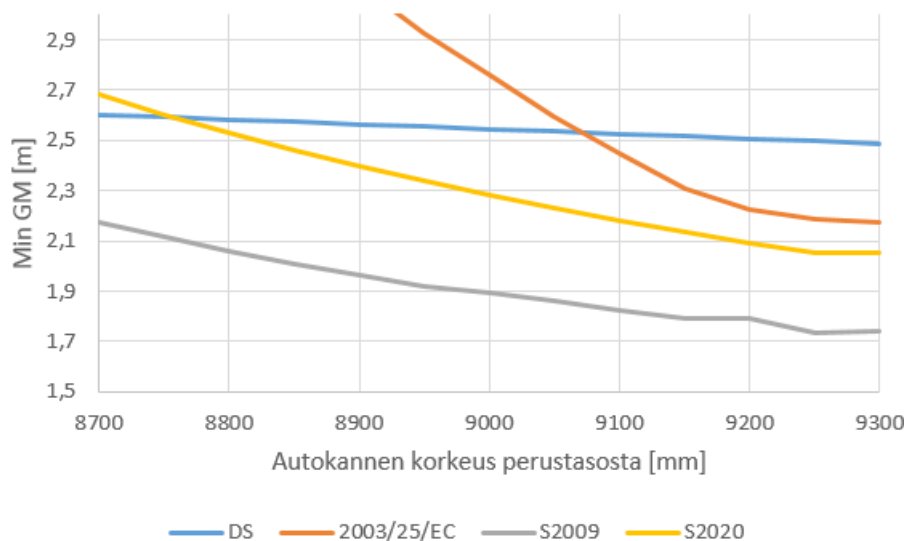
6.1 Tapaus 1: N=2000, ilman LLH-lastiruumaa

Tässä tapauksessa tarkasteltiin tilannetta kun aluksella on 2000 henkeä. Vaadittava R-indeksi on seuraava:

$$R_{S2009} = 0,79$$

$$R_{S2020} = 0,861$$

Lähtötilanteessa autokannen korkeus on 9300 mm ja tästä korkeutta vähennettiin 50 mm välein korkeuteen 8700 mm asti. Vaadittavat minimi-GM-arvot autokannen korkeuden funktiona on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Minimi-GM eri säännöillä, kun N=2000 ja ei alalastiruumaa.

Kuvasta havaitaan, että vettä kannella -säännöllä minimi-GM-vaatimus ylittää aluksen täyttää lastia kuvaavan lastitilanteen GM arvon, kun autokantta on laskettu 250 mm verrattuna lähtötilanteeseen. Solas 2020 säännöllä minimi-GM-vaatimus saavuttaa lastitilanteen GM arvon, kun autokantta on laskettu 550 mm verrattuna lähtötilanteeseen. Solas 2009 säännöllä minimi-GM-vaatimus ei ylitä lastitilanteen GM arvoa tutkituilla autokannen korkeuksilla. Välillä 9300...9250 minimi-GM-vaatimuksen havaitaan pienentyvän molemmilla tutkituilla probabilistisilla menetelmillä.

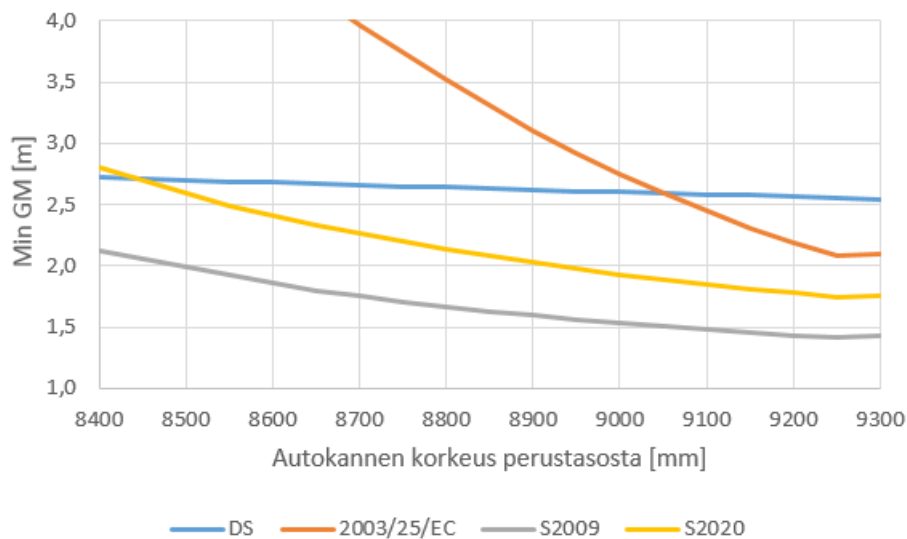
6.2 Tapaus 2: N=800, ilman alalastiruumaa

Tässä tapauksessa tarkasteltiin tilannetta, kun aluksella on 800 henkeä. Vaadittava R-indeksi on seuraava:

$$R_{S2020} = 0,819180$$

$$R_{S2009} = 0,733966$$

Lähtötilanteessa autokannen korkeus on 9300 mm ja tästä korkeutta vähennettiin 50 mm välein korkeuteen 8400 mm asti. Vaadittavat minimi-GM-arvot autokannen korkeuden funktiona on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Minimi-GM eri säännöillä, kun N=800 ja ei alalastiruumaa.

Kuvaajasta havaitaan, että vettä kannella -säännöllä minimi-GM-vaatimus ylittää aluksen täyttää lastia kuvaavan lastitilanteen GM-arvon, kun autokantta on laskettu 250 mm verrattuna lähtötilanteeseen. Solas 2020 säännöllä minimi-GM-vaatimus saavuttaa lastitilanteen GM-arvon, kun autokantta on laskettu 850 mm verrattuna lähtötilanteeseen. Solas 2009 säännöllä minimi-GM-vaatimus ei ylitä lastitilanteen GM-arvoa tutkituilla autokannen korkeuksilla. Välillä 9300...9250 minimi-GM-vaatimuksen havaitaan pienentyvän molemmilla tutkituilla probabilistisilla menetelmillä.

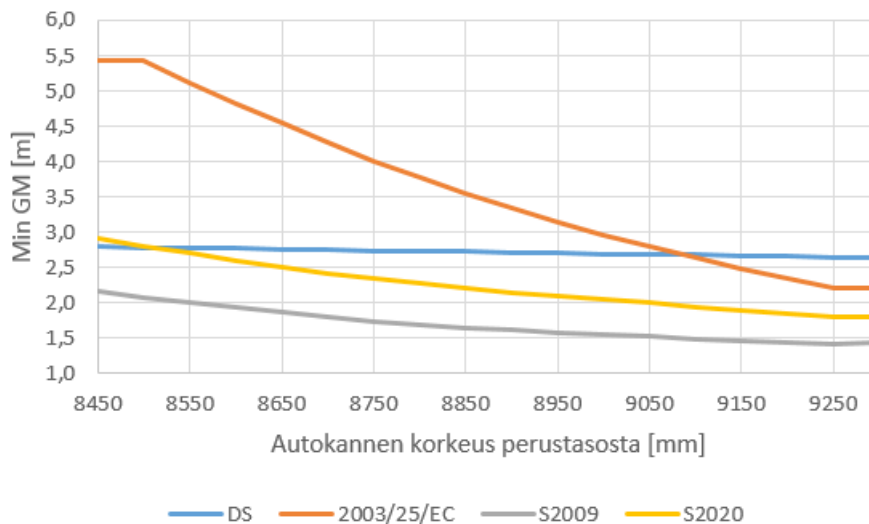
6.3 Tapaus 3: N=800, alalastiruumalla

Tässä tapauksessa tarkasteltiin tilannetta, kun aluksella on 800 henkeä ja alus on varustettu LLH-lastiruumalla. Vaadittava R-indeksi on seuraava:

$$R_{S2020} = 0,819180$$

$$R_{S2009} = 0,733966$$

Lähtötilanteessa autokannen korkeus on 9300 mm ja tästä korkeutta vähennettiin 50 mm välein korkeuteen 8450 mm asti. Vaadittavat minimi-GM-arvot autokannen korkeuden funktiona on esitetty kuvassa 21.

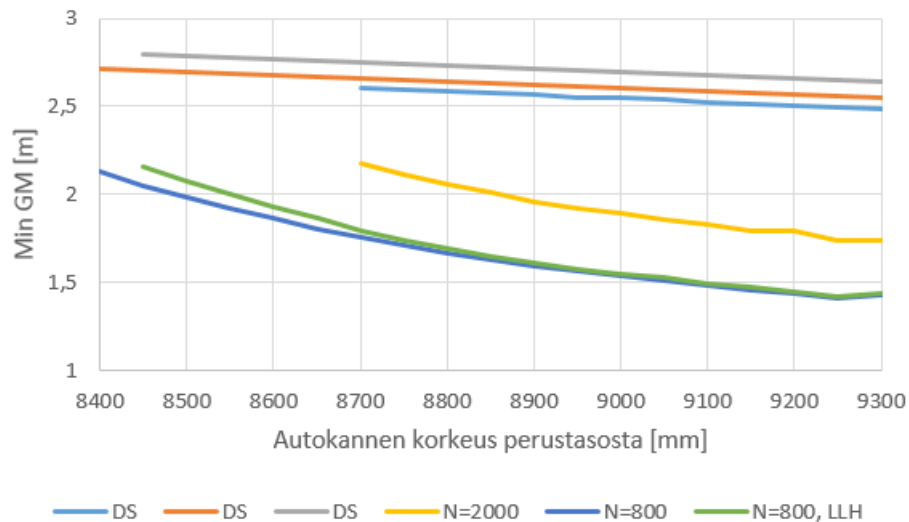


Kuva 21. Minimi-GM eri säännöillä, kun N=800 ja LLH-alalastiruumalla.

Kuvaajasta havaitaan, että vettä kannella -säännöllä minimi-GM-vaatimus ylittää aluksen täyttää lastia kuvaavan lastitilanteen GM arvon, kun autokantta on laskettu 250 mm verrattuna lähtötilanteeseen. Solas 2020 säännöllä minimi-GM-vaatimus saavuttaa lastitilanteen GM arvon, kun autokantta on laskettu 800 mm verrattuna lähtötilanteeseen. Solas 2009 säännöllä minimi-GM-vaatimus ei ylitä lastitilanteen GM arvoa tutkituilla autokannen korkeuksilla. Välillä 9300...9250 minimi-GM-vaatimuksen havaitaan pienentyvän molemmilla tutkituilla probabilistisilla menetelmillä. Vettä kannella -säännön tasainen osuus välillä 8500-8450 liittyy laskennan rajoituksiin, kun autokannelle kertyvän vesimäärän kanssa aluksen massa ylittää uppouman nostovoiman eli alus uppoaa.

6.4. Tapausten välinen vertailu

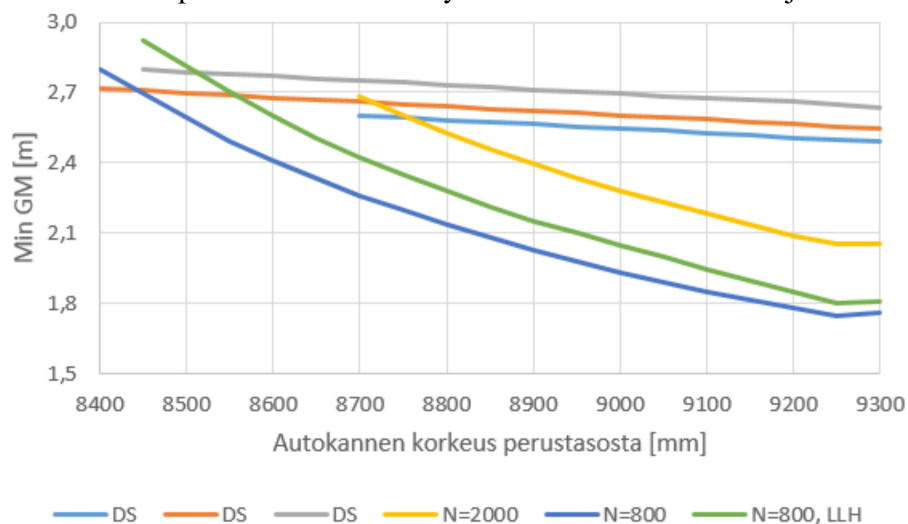
Kuvassa 22 on esitetty Solas 2009 minimi-GM-vaatimukset tutkittujen tapausten välillä sekä tapauksia edustavan täyden lastin lastitilanteen rajoittava GM arvo.



Kuva 22. Solas 2009 minimi-GM-vaatimukset eri tapauksissa.

Kuvasta havaitaan, että Solas 2009 säännössä aluksen henkilömäärällä on merkittävä vaikutus minimi-GM-vaatimukseen. 800 henkilön mallilla LLH-lastiruumalla varustetun aluksen minimi-GM-vaatimus alkaa erottua selvästi ei-LLH mallista, kun autokantta on laskettu yli 600 mm.

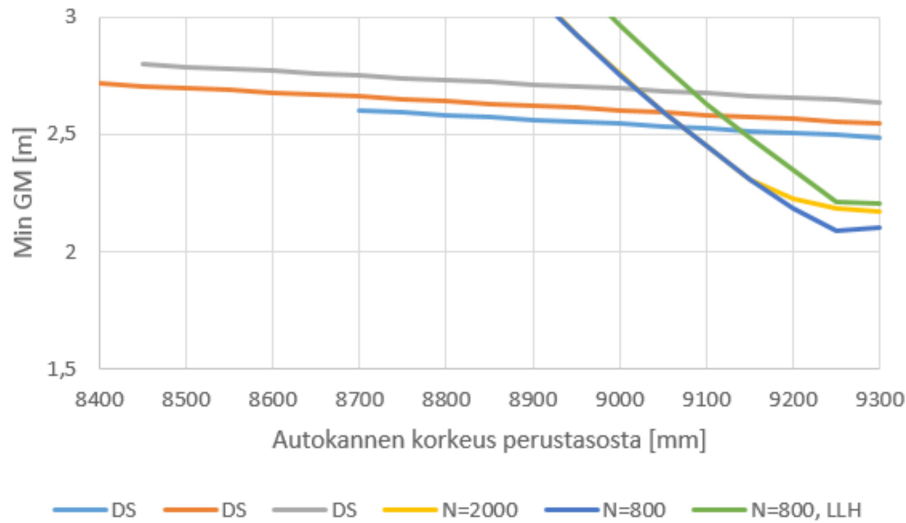
Kuvassa 23 on esitetty Solas 2020 säännön minimi-GM-vaatimukset tutkittujen tapausten välillä sekä tapauksia edustavan täyden lastin lastitilanteen rajoittava GM arvo.



Kuva 23. Solas 2020 minimi-GM-vaatimukset eri tapauksissa.

Kuvasta havaitaan, että Solas 2020 säännöllä sekä aluksen henkilömäärällä että LLH-lastiruumalla on selvästi havaittava vaikutus minimi-GM-vaatimukseen. Ero LLH ja ei-LLH mallin välillä kasvaa tasaisesti autokantta laskettaessa.

Kuvassa 24 on esitetty vettä kannella -säännön minimi-GM-vaatimukset tutkittujen tapausten välillä sekä tapauksia edustavan täyden lastin lastitilanteen rajoittava GM arvo.



Kuva 24. Vettä kannella säännön minimi-GM-vaatimukset eri tapauksissa.

Kuvasta havaitaan, että aluksen henkilömäärällä ei ole selvästi erottuvaa vaikutusta säännön minimi-GM-vaatimukseen. Sen sijaan LLH alalastiruuman minimi-GM-vaatimusta nostava vaikutus havaitaan kuvasta selvästi.

6.5 Herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysillä tutkitaan sitä, kuinka herkästi mallilla saavutetut tulokset muuttuvat, kun mallin lähtöarvoja ja -oletuksia muutetaan. Tarkoitus on selvittää lähtötietojen epävarmuuden vaikutus lopputulokseen. Analyysi toteutetaan muuttujilla, joiden oletetaan vaikuttavan merkittävästi tulokseen. Analyysissä muutetaan yhden muuttujan arvoa kerrallaan ja pidetään muut arvot vakiona. Lisäksi muuttujien keskinäistä vaikutusta havainnoidaan asettamalla kaikki muuttujat niiden ääriarvoihin herkkyysanalyysissä siten, että ne antavat suotuisimmat ja epäsuotuisimmat lähtöarvot laskentaan.

Tässä työssä merkittävimpänä epävarmuustekijöinä pidetään mallin kevytpainon painopistekorkeutta, lastin painopistekorkeutta sekä trimmin muutosta. Näiden vaikutusta arvioidaan muuttamalla niiden arvoa ± 10 cm varsinaisessa laskennassa käytettyyn arvoon verrattuna ja tarkastelemalla muutoksen vaikutusta täyden lastin lähtötilanteen DS korjattuun vaihtokeskuskorkeuteen GM, A-indeksiin ja minimi-GM-vaatimukseen tapauksessa, jossa autokannen korkeus on 9300 mm perustason yläpuolella. Herkkyysanalyysin tulokset on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Herkkyysanalyysin tulokset, erot prosentteina.

Tapaus	GM [m]	MinGM			A-indeksi	
	DS	2003/25/EC	S2009	S2020	S2009	S2020
Alkuperäinen	2,488	2,172	1,743	2,056	0,92559	0,91806
L1	-3,01%	-0,05%	0,17%	0,05%	-0,52%	-0,60%
L2	3,01%	-0,28%	-0,06%	-0,05%	0,47%	0,55%
L3	-0,76%	-0,23%	0,17%	-0,10%	-0,11%	-0,13%
L4	0,76%	0,00%	-0,06%	-0,10%	0,10%	0,12%
L5	-0,20%	1,84%	0,34%	0,05%	-0,31%	-0,35%
L6	-0,56%	-0,60%	-0,29%	-0,24%	-0,01%	-0,03%
L7	-3,98%	1,84%	0,52%	0,19%	-1,02%	-1,15%
L8	3,22%	-0,55%	-0,46%	-0,34%	0,57%	0,64%
L9	2,17%	-0,28%	0,00%	-0,10%	0,30%	0,37%

Herkkyysanalyysin tapauksessa L1 aluksen kevytpainon painopistekorkeutta on nostettu 10cm ja tapauksessa L2 laskettu 10 cm. Tapauksessa L3 lastin painopistekorkeutta on nostettu 10 cm ja tapauksessa L4 laskettu 10 cm. Tapauksessa L5 trimmi on asetettu arvoon +10 cm ja tapauksessa L6 arvoon -10cm. Tapauksessa L7 aluksen kevytpainon ja lastin painopistekorkeutta on nostettu 10 cm ja trimmi asetettu arvoon +10 cm. Tapauksessa L8 aluksen kevytpainon ja lastin painopistekorkeutta on laskettu 10 cm ja trimmi asetettu arvoon -10 cm. Tapauksessa L9 lastin painopistekorkeus alemmalla autokannella on asetettu 2,0 metriä autokannen yläpuolelle.

Tulosten perusteella havaitaan, että suurin vaikutus vettä kannella -laskentaan on trimmillä. Kun alus trimmataan + 10 cm trimmiin, eli syväys keulassa on 10 cm suurempi kuin perässä, kasvaa minimi-GM-vaatimus 1,84%. Yhtä suuri muutos tapahtui, kun lähtötiedot asetettiin huonoimman tapauksen mukaiseksi. Hieman yllättäen aluksen kevytpainon painopistekorkeuden kasvattaminen 10 cm:llä ei kasvattanut minimi-GM-vaatimusta vettä kannella –säännöllä tarkasteltaessa.

Probabilistisella säännöllä lähtötietojen muutoksilla on determinististä vettä kannella -sääntöä pienempi vaikutus minimi-GM-vaatimuksiin. Solas 2020 säännöllä muutosten vaikutus on selvästi pienempi kuin Solas 2009 säännöllä. Yksittäisistä muutoksista suurin vaikutus oli tässäkin tapauksessa aluksen trimmaamisella keula alhaalla asentoon, jolloin Solas 2009 säännöllä minimi-GM-vaatimus kasvaa 0,34%. Solas 2020 säännöllä minimi-GM-vaatimus kasvaa tällöin 0,05%. Yhtä suuri muutos tapahtuu kasvattamalla aluksen kevytpainon painopistekorkeutta 10 cm:llä.

Vuotovakavuusindeksin laskennassa lähtötietojen muuttamisessa sääntöjen herkkyys on päinvastainen, eli Solas 2020 säännöllä tulokset muuttuvat hieman herkemmin kuin Solas 2009 säännöllä. Yksittäisistä muutoksista aluksen kevytpainon painopistekorkeuden muuttamisella on suurin vaikutus indeksiin molemmilla säännöillä, -0,60%...+0,55% muutos A-indeksiin.

7 Pohdintaa

IMO:n siirtyessä myös matkustaja-alusten osalta deterministisestä Solas 1990 vuotovakavuussäännöstä probabilistiseen Solas 2009 vuotovakavuussääntöön, oli jo tuolloin nähtävillä, että vettä kannella -tilanteet jäävät tulevassa Solas 2009 säännössä kokonaan huomioimatta. Tämä johti lopulta Euroopassa siihen, että rinnalla säilytettiin direktiivillä EU:n laajuisesti käyttöön otettu Tukholman sopimus, jotta matkustaja-autolauttojen vuotovakavuus säilyy riittävän korkealla tasolla.

Muutoksia Solas 2009 ja Solas 2020 sääntöjen välillä voidaan pitää kannatettavana etenkin s-kertoimen laskentaan tehtävien muutosten takia. Vaikka kriteerit, joilla vettä kannella -tilanteet sisällytetään SOLAS 2020 sääntöön ovat selvästi kevyemmät kuin Tukholman sopimuksessa, on nyt tehtävä muutos kuitenkin askel oikeaan suuntaan. Sääntömuutos tulee parantamaan etenkin aasialaisten matkustaja-autolauttojen turvallisuustasoa, sillä siellä ei sovelleta Tukholman sopimuksen kaltaista paikallista sääntelyä.

Tukholman sopimuksessa vuotovakavuusvaatimuksissa huomioon otettava merkitsevä aallonkorkeus oli määritelty aluksen operointialueen mukaisesti. Sen sijaan uutta Solas 2020 sääntöä voi hyvin kritisoida siitä, että se ei anna helpotuksia aluksille, jotka operoivat suojaisissa olosuhteissa, joissa merkitsevä aallonkorkeus jää selvästi avomeriolosuhteita matalammaksi. Nykyisellään, kun Solas 2020 vastaa vaatimustasoltaan operointia rajoitetulla aallonkorkeudella, ei tämän asian merkitys näy niin selvästi. Tulevaisuudessa asia on kuitenkin syytä ottaa huomioon, mikäli vuotovakavuussäännön kriteerejä päädytään kiristämään tavoitellessa Solas-sääntöön Tukholman sopimusta vastaavaa turvallisuustasoa vettä kannella -tilanteissa.

Lisäksi R-indeksin kohottamista perustellaan sillä, että nykyisellä alusjoukolla suuronnettomuuksien esiintymistiheys on liian suuri. Tämä perustuu olettamukseen, että nykyiset liikenteessä olevat alukset on rakennettu siten, että ne täyttävät R-indeksi vaatimuksen ilman marginaalia, eli niiden A-indeksi=R-indeksi. Tämä olettaus kuvaa etenkin eurooppalaisten matkustaja-autolauttojen selviytymiskyvyn paljon alhaisemmaksi kuin se todellisuudessa on, sillä etenkin Tukholman sopimuksen täyttävän matkustaja-aluksen A-indeksi ylittää vaadittavan R-indeksin selvällä marginaalilla.

Tutkimusprojekteissa esiin nostettavat onnettomuudet, kuten esimerkiksi kuvassa 10 nimetyt tapaukset, ovat lähemmin tarkasteltuna hieman kyseenalaisia käytettäväksi perusteluna R-indeksin kasvattamiseen. Kyseisissä onnettomuuksissa kaatuneet ja uponneet alukset on rakennettu 70- ja 80-luvulla ja onnettomuudet ovat tapahtuneet joko ennen Tukholman sopimuksen solmimista tai merialueella, jossa sopimusta ei sovelleta. Lisäksi tapausten taustalla on vaikuttanut merkittäviä kunnossapidollisia tai operatiivisia virheitä. Kuvaavaa onkin, että matkustaja-autolautta Estonian onnettomuuden jälkeen rakennetuille, Tukholman sopimuksen täyttävälle matkustaja-autolautoille ei ole sattunut vielä kaatumiseen johtaneita onnettomuuksia, joten vettä kannella -säännön voidaan katsoa takaavan varsin hyvän turvallisuustason.

8 Johtopäätökset

Tutkimuksessa suunniteltiin nykyaikainen, Itämerelle soveltuva 2000 henkilöä kuljettava matkustaja-autolautta siten, että alus täyttää sekä tulevan Solas 2020 vuotovakavuussäännön että nykyisen voimassa olevan Tukholman sopimuksen vettä kannella -säännön. Tutkimuksessa aluksen vuotovakavuutta heikennettiin autokantta laskemalla kunnes alus ei enää täyttänyt kumpaakaan sääntöä.

Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan sanoa, että tutkitun aluksen tapauksessa vettä kannella -sääntö on edelleen vuotovakavuussäännöistä se, joka asettaa vaatimustason aluksen suunnittelulle. Kaikissa tässä tutkimuksessa tarkastelluissa tapauksissa vettä kannella-säännön minimi-GM-vaatimus saavutti täyden lastin lastitilanteen GM arvon selvästi aikaisemmin verrattuna Solas 2009 ja Solas 2020 sääntöihin.

Solas 2020:n edeltäjänsä korkeampi vaatimus R-indeksille tulee nostamaan merkittävästi tulevaisuudessa rakennettavien matkustaja-aluksien turvallisuustasoa. Esimerkiksi risteilyalukset eivät kuulu vettä kannella -sääntelyn alaisuuteen, joten vaadittavan indeksin nostaminen näkyy välittömästi aluksen vesitiiviin osastoinnin toteutuksessa. Lisäksi niillä Euroopan ulkopuolisilla merialueilla, joilla matkustaja-autolautoilta ei vaadita vettä kannella -sääntöjen täyttämistä, tulee säännön vaikutus näkymään uusien matkustaja-autolautojen parantuneena turvallisuutena vuotoon johtavissa törmäystilanteissa.

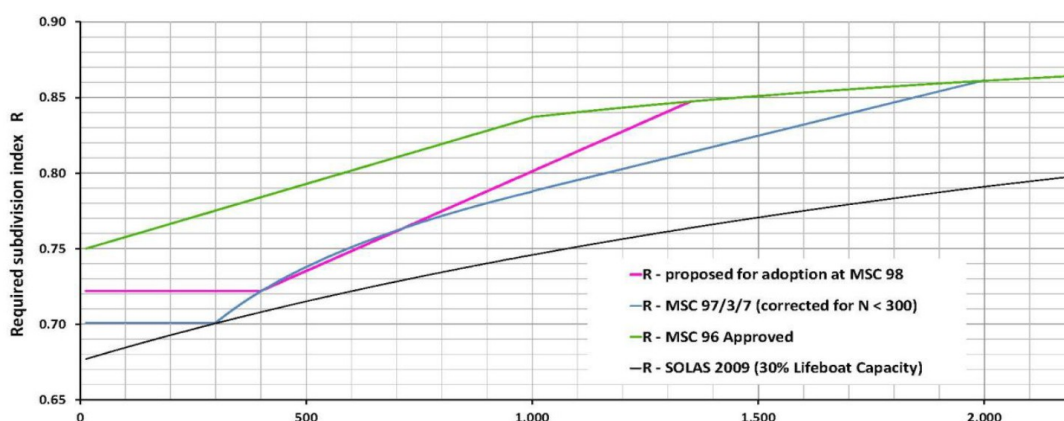
Solas 2020:n eduksi lasketaan myös se, että pelastusvenepaikkojen suhde matkustajamäärään ei enää vaikuta R-indeksiin. Tämä mahdollistaa nykyaikaisen MES-alusevakuointijärjestelmän laajemman käytön, mikä helpottaa ja nopeuttaa aluksen evakuointia myös muissa hätätilanteissa, esimerkiksi tulipalossa.

Tässä tutkimuksessa tutkittu malli LLH-alalastiruumasta kuvaa kyseistä konseptia varsin huonosti, sillä tutkittu alus on liian lyhyt tehokkaan alalastiruuman toteuttamiseksi ilman laajamittaisia muutoksia aluksen yleisjärjestelyyn, jolloin aluksen vertailukelpoisuus olisi ollut vieläkin kyseenalaisempi. Kasvaneen lastikapasiteetin ja hitaamman lastaamisen johdosta alalastiruumallisen aluksen operointiprofiili tulisi olemaan erilainen verrattuna 'tavalliseen' malliin. Alalastiruumallisen aluksia tulisikin tutkia ja vertailla erillisenä ryhmänä luotettavien tulosten aikaansaamiseksi. Tässä tutkimuksessa tarkastellulla mallilla vuotovakavuutta heikentävä vaikutus ei näy yhtä selvästi kuin muissa LLH alalastiruumaa tutkineissa julkaisuissa, joissa vaikutus oli varsin merkittävä ja pudotus A-indeksiin jopa 8-10%.

Eurooppalaisten matkustaja-autolautojen vesitiiviiseen osastointiin sääntöuudistus tuskin vaikuttaa ja vaikuttaa epätodennäköiseltä, että Euroopan Unioni luopuisi vettä kannella -säännöstä. On tosin huomioitava, että tutkimuksen pääasiallisena otoksena on ainoastaan yksi runkomuoto ja vesitiivis osastointi kahdella eri matkustajamäärällä. Tulevan sääntökehityksen tueksi olisikin hyvä tutkia paljon suurempaa joukkoa erilaisia matkustaja-autolautoja erilaisilla matkustajamäärillä. Tutkittavaksi olisi otettava myös ne alukset, jotka operoivat olosuhteissa, jossa merkitsevä aallonkorkeus on alle 4,0 metriä, sillä tulevaan Solas 2020 vuotovakavuussääntöön ei sisälly vettä kannella -säännön mukaista mahdollisuutta vaatimusten helpottamiseen pienemmillä aallonkorkeuksilla. Suuremmalla otoksella saataisiin kattavampi kokonaiskuva sääntömuutosten vaikutuksista vaatimuksiin tulevaisuuden laivasuunnittelussa.

9 Jälkisanat

Pian tämän tutkimuksen tulosten valmistuttua Merenkulun turvallisuuskomitea järjesti 98:n kokouksensa, jossa esiteltiin Kiinan, Japanin, Filippiinien ja Yhdysvaltojen uusi ehdotus [43] R-indeksin muuttamiseksi. Ehdotuksen mukaan alle 400 henkilöä kuljettavalla aluksella R-indeksi on 0,722; 400 ja 1350 henkilön välillä R-indeksi nousisi lineaarisesti tässä tutkimuksessa käsiteltyyn, MSC 96 kokouksen hyväksymään R-indeksiin ja yli 1350 henkilöllä R-indeksi olisi MSC 96 kokouksessa hyväksytyn R-indeksin mukainen. Yli 6000 henkilön tapauksessa R-indeksin laskennassa käytettävä yhtälö esitetään yksinkertaistetussa muodossa, ilman erikseen laskettavaa C1-kerrointa. Uuden ehdotuksen mukainen R-indeksi henkilömäärän funktiona on esitetty kuvassa 25 ja yhtälöt R-indeksin laskemiseksi on esitetty taulukossa 8. Merenkulun turvallisuuskomitea hyväksyi ehdotuksen yksimielisesti ja muutos Solas-yleissopimukseen tulee voimaan 1.1.2020 [44].



Kuva 25. MSC 98:n hyväksymä R-indeksi henkilömäärän N funktiona. [43]

Taulukko 8. MSC 98:n hyväksymän R-indeksin laskeminen.[43]

Henkilömäärä N	R
$N < 400$	$R = 0,722$
$400 \leq N \leq 1350$	$R = N / 7580 + 0,66923$
$1350 \leq N \leq 6000$	$R = 0,0369 \cdot \ln(N + 89,048) + 0,579$
$N > 6000$	$R = 1 - (852,5 + 0,03875 \cdot N) / (N + 5000)$

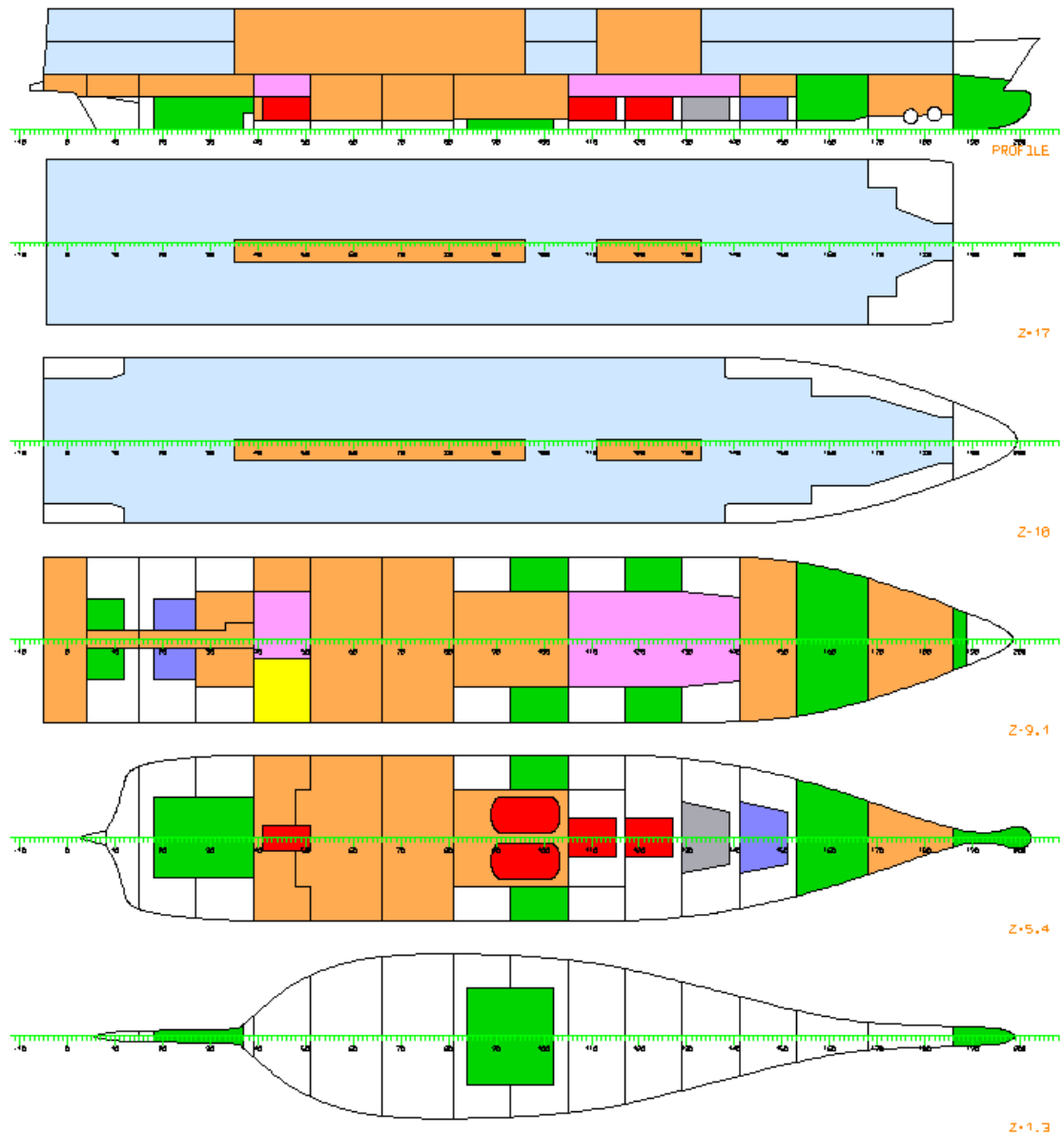
10 Lähdeluettelo

- [1] Dr. Andrzej Jasionowski (2011) Study of the specific damage stability parameters of Ro-Ro passenger vessels according to SOLAS 2009 including water on deck calculation, The Ship Stability Research Centre, Strathclyden yliopisto, Yhdistynyt kuningaskunta.
- [2] Biran, A., (2003) Ship Hydrostatics and Stability 1. painos Oxford, United Kingdom: Elsevier Ltd. 363 s. ISBN: 0 7506 4988 7
- [3] International Maritime Organization (2014) Solas, Consolidated Edition, 2014: Consolidated Text of the International Convention on the Safety of Life at Sea, 1974, as Amended, 420 s. ISBN 978-92-801-15949
- [4] International Maritime Organization (2013) SDC 1/7/Add.1 Revision of Solas Chapter II-1 Subdivision and Damage Stability Regulations, Report of the SDS Correspondence Group
- [5] Matusiak, J. (2000) Laivan kelluvuus ja vakavuus 4. korjattu painos Helsinki, Suomi: Yliopistokustannus/Otatieto. 180 s. ISBN 951-672-293-8
- [6] Krueger S., Nafouti O., Mains C. (2015) A New Approach for the Water- On- Deck- Problem of RoRo- Passenger Ships, Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, 14-19 June 2015, Glasgow, Skotlanti.
- [7] D. Vassalos & A. Papanikolaou (2001) Stockholm Agreement - Past, Present & Future (Part 1), SU-SSRC/NTUA-SDL
- [8] Yhdistyneet Kansakunnat (1948) Convention on the Intergovernmental maritime consultative organization, Geneve.
- [9] International Maritime Organization (2013), IMO - What is it, Lontoo, UK,[Viitattu 1.1.2017]. Saatavissa: [http://www.imo.org/About/Documents/What it is Oct 2013_Web.pdf](http://www.imo.org/About/Documents/What%20it%20is%20Oct%202013_Web.pdf)
- [10] International Maritime Organization (1998) Focus on IMO - SOLAS: the International Convention for the Safety of Life at Sea 1974, Lontoo.
- [11] International Maritime Organization (2004) Solas, Consolidated Edition, 2004: Consolidated Text of the International Convention on the Safety of Life at Sea, 1974, and its Protocol of 1988: articles, annexes and certificates, 566 s. ISBN 978-9280141832
- [12] Viron, Ruotsin ja Suomen hallitusten asettama kansainvälinen tutkintakomissio (2000) Loppuraportti Itämerellä 28.9.1994 tapahtuneen matkustaja-autolautan kaatumisen tutkinnasta MV Estonia. Helsinki.
- [13] Bruce L. Hutchison et al. (1996) IR-1996-11: Safety Initiatives from the SNAME ad hoc Ro-Ro Safety panel. Ro Ro 96 Conference 21.-23.5.1996, Lübeck, Saksa.
- [14] International Maritime Organization (1995) SOLAS/CONF.3/46 Conference of Contracting Governments to the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974.

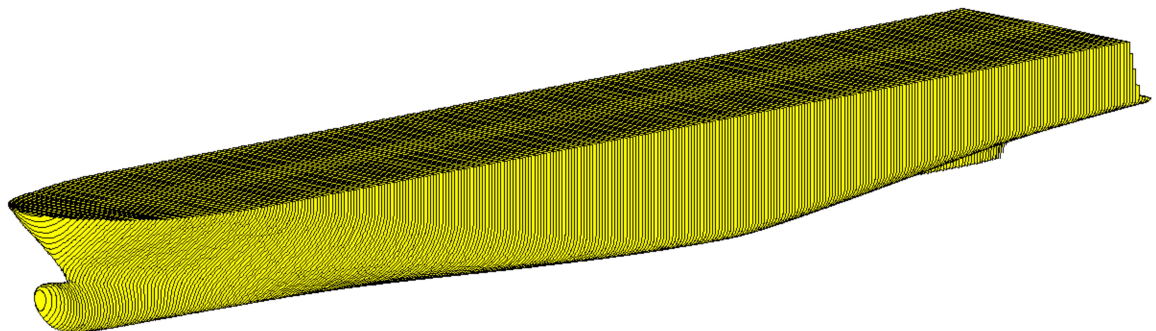
- [15] WEGEMT Workshop on Damage Stability of Ships (1995), Proceedings of a one-day Workshop held on Friday 20 October 1995, TU Denmark, Lyngby, ISBN 1 900453 00 2
- [16] International Maritime Organization (1996) Circular letter No. 1891, Lontoo
- [17] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2003/25/EC, on specific stability requirements for ro-ro passenger ships, Luxemburgissa 14.4.2003. Euroopan Unionin virallinen julkaisu L 123 s.22-41, 17.5.2003.
- [18] Vassalos, D., Jasionowski, A., Tsakalakis, N., (2008) SOLAS 90, Stockholm Agreement, SOLAS 2009 - The False Theory of Oranges and Lemons, Proceedings of the 10th International Ship Stability Workshop
- [19] International Maritime Organization (1991) MSC/Circ.547, A/Amax calculation procedure.
- [20] Tagg, G. (2014) Comparison of survivability between SOLAS 90/95 and SOLAS 2009 ships - A retrospective view 10 years on from project HARDER, Proceedings of the 14th International Ship Stability Workshop 29.9.-1.10.2014 Kuala Lumpur, Malaysia.
- [21] International Maritime Organization (2006), Resolution MSC.216(82) Adoption of amendments to the international convention for the safety of life at sea.
- [22] Lützen, M. (2001) Ship Collision Damage, Väitöstyö, Technical University of Denmark. Lyngby. 240 s.
- [23] International Maritime Organization (2008) MCS 84-22-12, Work Programme, Specific ship stability requirements for ro-ro passenger ships
- [24] International Maritime Organization (2004) SLF 47-17 Report To The Maritime Safety Committee
- [25] International Maritime Organization (2008) MCS 84-22-23, Work Programme, Specific ship stability requirements for ro-ro passenger ships
- [26] International Maritime Organization (2008) MCS 84-24, Report of the Maritime Safety Committee on its eighty-fourth session
- [27] International Maritime Organizations (2009) SLF 52/11/1 Damage stability regulations for ro-ro passenger ships. Report of the SDS Correspondence Group
- [28] Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH (2009) Research for the parameters of the Damage Stability Rules including the Calculation of Water on Deck of Ro-Ro Passenger Vessels, for the amendment of the Directives 2003/23/EC and 98/18/EC - Final Report, Hampuri, Saksa
- [29] Miettinen, P. (1997) Vuotovakavuusvaatimusten implementointi RoRo-aluksen alkusuunnitteluprosessiin. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto. Espoo. 83s.

- [30] Hamann, R., Olufsen, O., Zaraphonitis, G. (2012) Development of a new damage stability requirement based on Cost-Benefit Assessment, GOAL based Damage Stability. Goals
- [31] International Maritime Organization (2008) MSC85/INF.3 FSA - RoPax ships. Details of the Formal Safety Assessment
- [32] DNV GL (2015) Report No 2015-0166 Rev. 3, Risk Acceptance Criteria and Risk Based Damage Stability. Final Report, part 2: Formal Safety Assessment, Høvik, Norja
- [33] Rousseau, J. H. (1997) Flooding Protection of RO-RO Ferries, Phase II, Transportation Development Centre
- [34] Molyneux D. Cumming D., Rousseau J. (1997) The Use of Freeing Ports to Prevent the Capsize of Damaged Ro-Ro Ferries, SD-3 Stability Panel, The Society of Naval Architects and Marine Engineers
- [35] International Maritime Organization (2015) MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.1. Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process
- [36] International Maritime Organization (2000) MSC 72-16 Formal Safety Assessment, Decision parameters including risk acceptance criteria
- [37] DNV GL (2015) Report No 2015-0165 Rev. 1, Risk Acceptance Criteria and Risk Based Damage Stability. Final Report, part 1: Risk Acceptance Criteria
- [38] International Maritime Organization (2016) SDC 3-21 Report to The Maritime Safety Committee
- [39] Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (2014) Validation Study regarding an Increased Subdivision Index R for Passenger and Special Purpose Ships in International Seaborne Trade - Final Report - Version 1.2, Hampuri
- [40] Danish Maritime Authority (2015) Small Ro/Pax Vessel Stability Study
- [41] International Maritime Organization (2008) Resolution MSC.267(85), Adoption of the International Code on Intact Stability, 2008 (2008 IS Code)
- [42] Napa Ltd, NAPA for Design 2016.2 Manuals
- [43] International Maritime Organization (2017) MCS 98/3/3 Proposed modifications to the draft amendments to Solas regulation II-1/6
- [44] International Maritime Organization (2017) MCS 98/23 Report of the Maritime Safety Committee on its ninety-eighth session

Liite 1. Napamalli



Kuva 26. Aluksen yleisjärjestely NAPA-mallissa.



Kuva 27. Rungon 3D-malli.

Taulukko 1. Aluksen tilat NAPA-mallissa.

NAME	PURP	VOLM m3	VNET m3	CGX m	CGY m	CGZ m	IY*RHO tm	IY/IMO tm
CAPACITY OF Solid cargo (RHO=1)								
R010301	CAS	18685,2	18685,2	66,37	0,10	11,98	205746,0	10611 1
R010501	CAS	21406,1	21406,1	68,82	0,10	17,55	248820,9	22771 3
SUBTOTAL	CAS	40091,2	40091,2	67,68	0,10	14,95		
CAPACITY OF Control Room (RHO=1)								
R050201	CON	386,7	386,7	36,00	-8,60	7,40	952,8	953
CAPACITY OF Diesel Oil (RHO=0.86)								
R050102	DO	137,8	135,0	36,80	0,00	3,45	42,5	42
R100102	DO	216,5	212,2	88,00	0,00	3,45	164,8	162
R110102	DO	216,5	212,2	97,60	0,00	3,45	164,8	162
SUBTOTAL	DO	570,7	559,3	79,28	0,00	3,45		
CAPACITY OF Fresh Water (RHO=1)								
R030202	FW	147,7	144,8	18,00	-4,10	7,40	94,5	93
R030204	FW	147,7	144,8	18,00	4,10	7,40	94,5	93
R130103	FW	171,1	167,6	116,59	2,63	3,45	99,2	115
R130102	FW	171,1	167,6	116,59	-2,63	3,45	99,2	115
SUBTOTAL	FW	637,6	624,8	70,90	0,00	5,28		
CAPACITY OF General Spaces (RHO=1)								
R050202	GE	415,9	407,6	36,00	2,40	7,40	1185,2	1162
R100202	GE	1729,2	1694,6	98,12	0,00	7,40	9519,7	9632
SUBTOTAL	GE	2145,0	2102,1	86,07	0,47	7,40		

NAME	PURP	VOLM m3	VNET m3	CGX m	CGY m	CGZ m	IY*RHO tm	IY/IMO tm
CAPACITY OF Grey Water (RHO=1)								
R120103	GWT	171,1	167,6	106,99	2,63	3,45	99,2	115
R120102	GWT	171,1	167,6	106,99	-2,63	3,45	99,2	115
SUBTOTAL	GWT	342,1	335,3	106,99	0,00	3,45		
CAPACITY OF LNG (RHO=0.421)								
R080203	LNG	300,5	300,5	76,92	3,87	5,33	79,7	54
R080202	LNG	300,5	300,5	76,92	-3,87	5,33	79,7	54
SUBTOTAL	LNG	601,1	601,1	76,92	0,00	5,33		
CAPACITY OF Machinery Sp. (RHO=1)								
R010201	MMA	287,3	287,3	-0,29	-6,85	7,86	1611,4	1058
R010202	MMA	287,3	287,3	-0,29	6,85	7,86	1611,4	1058
R020203	MMA	93,6	93,6	7,60	0,00	7,40	16,1	16
R030203	MMA	228,0	228,0	22,35	0,21	7,40	59,5	73
R040202	MMA	244,4	244,4	26,40	-4,75	7,40	240,6	241
R040203	MMA	220,7	220,7	26,14	5,04	7,40	189,4	206
R060101	MMA	2729,8	2729,8	46,51	0,00	5,30	22320,4	20676
R050101	MMA	729,7	729,7	35,42	0,00	3,64	14701,6	9360
R070101	MMA	2635,5	2635,5	58,80	0,00	5,35	21485,8	21486
R080201	MMA	1732,1	1732,1	73,53	0,00	5,62	4516,0	4352
R150101	MMA	908,0	908,0	140,44	0,00	6,60	1777,8	3033
R130201	MMA	909,7	909,7	117,50	0,00	7,46	12924,9	14543
R050203	MMA	211,6	211,6	36,00	11,00	7,40	156,1	156
R040301	MMA	1950,0	1950,0	52,40	-1,50	14,85	189,7	190
R100301	MMA	703,3	703,3	97,60	-1,50	14,85	68,4	68
SUBTOTAL	MMA	13871,1	13871,1	62,42	-0,12	7,57		

NAME	PURP	VOLM m3	VNET m3	CGX m	CGY m	CGZ m	IY*RHO tm	IY/IMO tm
CAPACITY OF Void (RHO=1.025)								
RO20201	VOID	569,9	569,9	8,41	0,00	7,37	14762,5	5296
R090101	VOID	413,2	413,2	79,72	0,00	1,73	13545,8	5152
R100101	VOID	421,2	421,2	89,21	0,00	3,45	3289,8	1871
R110101	VOID	773,3	773,3	98,52	0,00	3,56	13962,1	10467
R120101	VOID	958,0	958,0	108,26	0,00	5,42	12432,0	5397
R130101	VOID	343,3	343,3	118,16	0,00	3,87	5013,8	2494
R030101	VOID	771,4	771,4	16,27	0,00	6,83	16057,1	3053
R000201	VOID	78,6	78,6	-5,10	0,00	7,18	4070,4	2715
R050001	VOID	96,8	96,8	37,05	0,00	0,95	1524,9	1543
R060001	VOID	319,2	319,2	47,44	0,00	0,80	10647,8	11860
R070001	VOID	438,4	438,4	58,89	0,00	0,72	19135,5	19898
R080002	VOID	1085,8	1085,8	69,36	0,00	4,48	14131,4	5098
R100001	VOID	1138,1	1138,1	88,73	0,00	4,26	13870,5	5462
R110001	VOID	230,4	230,4	98,17	0,00	0,77	5091,4	6434
R120001	VOID	164,0	164,0	107,69	0,00	0,79	2068,4	2819
R130001	VOID	107,9	107,9	117,24	0,00	0,81	655,6	953
R140001	VOID	84,0	84,0	128,17	0,00	0,87	177,4	159
R150001	VOID	107,1	107,1	141,16	0,00	1,30	77,7	90
R160301	VOID	915,9	915,9	154,11	0,00	12,62	3994,1	4106
R120301	VOID	1002,0	1002,0	131,81	10,01	12,26	1127,2	1104
R120302	VOID	1002,0	1002,0	131,81	-10,01	12,26	1127,2	1104
R150501	VOID	665,8	665,8	142,73	9,35	17,55	982,6	1008
R150502	VOID	665,8	665,8	142,73	-9,35	17,55	982,6	1008
R010001	VOID	65,1	65,1	8,41	0,00	2,95	4,4	5
R040101	VOID	740,1	740,1	26,78	0,00	5,96	14091,0	2869
R010302	VOID	241,5	241,5	2,79	12,23	11,99	43,1	43
R010303	VOID	241,5	241,5	2,79	-12,23	11,99	43,1	43
SUBTOTAL	VOID	13640,3	13640,3	89,78	0,00	7,50		

CAPACITY OF Water Ballast (RHO=1.025)

R020202	WB	131,3	128,7	6,40	-4,10	7,40	86,1	84
R020204	WB	131,3	128,7	6,40	4,10	7,40	86,1	84
R030103	WB	344,3	337,4	23,61	2,90	3,75	405,5	179
R030102	WB	344,3	337,4	23,61	-2,90	3,75	405,5	179
R160101	WB	304,4	298,3	153,75	0,00	4,82	41,2	162
R140101	WB	1492,7	1462,8	127,97	0,00	6,08	6399,5	8357
R080103	WB	322,9	316,5	79,20	11,00	6,40	160,0	157

Liite 1(5/5)

R080101	WB	322,9	316,5	79,20	-11,00	6,40	160,0	157
R080001	WB	210,0	205,8	74,40	4,05	0,90	653,7	641
R080003	WB	210,0	205,8	74,40	-4,05	0,90	653,7	641
R110201	WB	210,4	206,2	98,39	10,98	7,41	159,9	156
R110202	WB	210,4	206,2	98,39	-10,98	7,41	159,9	156
<hr/>								
SUBTOTAL	WB	4234,9	4150,2	89,62	0,00	5,36		
<hr/>								
TOTAL		76520,7	76362,0	72,60	0,00	11,21		

Liite 2. Lähtöarvot

N=2000

Ei alalastiruumaa

Taulukko 1. Lähtöarvot

h_maindeck	T_service	GM_service	T_partial	GM_partial	T_light	GM_light
9300	6,4	2,488	6,004	3,181	5,409	3,216
9250	6,4	2,497	6,004	3,186	5,409	3,219
9200	6,4	2,507	6,004	3,192	5,409	3,219
9150	6,4	2,516	6,004	3,197	5,409	3,218
9100	6,4	2,526	6,004	3,203	5,409	3,218
9050	6,4	2,536	6,004	3,208	5,409	3,217
9000	6,4	2,545	6,004	3,214	5,409	3,216
8950	6,4	2,554	6,004	3,219	5,409	3,216
8900	6,4	2,564	6,004	3,225	5,409	3,215
8850	6,4	2,573	6,004	3,230	5,409	3,215
8800	6,4	2,583	6,004	3,236	5,409	3,214
8750	6,4	2,593	6,004	3,242	5,409	3,214
8700	6,4	2,602	6,004	3,247	5,409	3,213

N =800

Ei alalastiruumaa

Taulukko 2. Lähtöarvot

h_maindeck	T_service	GM_service	T_partial	GM_partial	T_light	GM_light
9300	6,4	2,546	6,004	3,321	5,409	3,289
9250	6,4	2,555	6,004	3,327	5,409	3,293
9200	6,4	2,565	6,004	3,332	5,409	3,292
9150	6,4	2,574	6,004	3,338	5,409	3,292
9100	6,4	2,584	6,004	3,343	5,409	3,291
9050	6,4	2,594	6,004	3,349	5,409	3,291
9000	6,4	2,603	6,004	3,354	5,409	3,290
8950	6,4	2,612	6,004	3,360	5,409	3,290
8900	6,4	2,622	6,004	3,365	5,409	3,289
8850	6,4	2,631	6,004	3,371	5,409	3,288
8800	6,4	2,641	6,004	3,376	5,409	3,288
8750	6,4	2,650	6,004	3,382	5,409	3,288
8700	6,4	2,660	6,004	3,388	5,409	3,287
8650	6,4	2,669	6,004	3,393	5,409	3,290
8600	6,4	2,679	6,004	3,399	5,409	3,290
8550	6,4	2,688	6,004	3,404	5,409	3,289
8500	6,4	2,698	6,004	3,410	5,409	3,288
8450	6,4	2,707	6,004	3,415	5,409	3,290
8400	6,4	2,717	6,004	3,421	5,409	3,290

N=800
Alalastiruuma

Taulukko 3. Lähtöarvot.

h_maindeck	T_service	GM_service	T_partial	GM_partial	T_light	GM_light
9300	6,459	2,638	6,026	3,379	5,377	3,259
9250	6,459	2,647	6,026	3,384	5,377	3,260
9200	6,459	2,659	6,026	3,390	5,377	3,260
9150	6,459	2,666	6,026	3,395	5,377	3,260
9100	6,459	2,676	6,026	3,401	5,377	3,260
9050	6,459	2,685	6,026	3,406	5,377	3,260
9000	6,459	2,694	6,026	3,412	5,377	3,260
8950	6,459	2,704	6,026	3,417	5,377	3,260
8900	6,459	2,713	6,026	3,423	5,377	3,260
8850	6,459	2,723	6,026	3,429	5,377	3,260
8800	6,459	2,732	6,026	3,434	5,377	3,260
8750	6,459	2,741	6,026	3,440	5,377	3,260
8700	6,459	2,751	6,026	3,445	5,377	3,260
8650	6,459	2,760	6,026	3,451	5,377	3,260
8600	6,459	2,770	6,026	3,456	5,377	3,260
8550	6,459	2,779	6,026	3,462	5,377	3,260
8500	6,459	2,788	6,026	3,467	5,377	3,260
8450	6,459	2,798	6,026	3,473	5,377	3,260

Herkkyysanalyysi

N=2000

Ei alalastiruumaa

Taulukko 4. Lähtöarvot

Versio	h_main deck	T_service	GM_service	T_partial	GM_partial	T_light	GM_light
0	9300	6,400	2,488	6,004	3,181	5,409	3,216
L1	9300	6,400	2,413	6,004	3,099	5,409	3,122
L2	9300	6,400	2,563	6,004	3,262	5,409	3,309
L3	9300	6,400	2,469	6,004	3,170	5,409	3,216
L4	9300	6,400	2,507	6,004	3,191	5,409	3,216
L5	9300	6,400	2,483	6,004	2,993	5,409	3,156
L6	9300	6,400	2,474	6,004	3,330	5,409	3,237
L7	9300	6,400	2,389	6,004	2,900	5,409	3,048
L8	9300	6,400	2,568	6,004	3,423	5,409	3,333
L9	9300	6,400	2,542	6,004	3,240	5,409	3,216

Liite 3. Tulokset

N=2000

Ei alalastiruumaa

Taulukko 1. Tulokset

	GM	MinGM			A	
h_maindeck	DS	2003/25/EC	S2009	S2020	S2009	S2020
9300	2,488	2,172	1,743	2,056	0,92559	0,91806
9250	2,497	2,186	1,735	2,053	0,92521	0,91757
9200	2,507	2,228	1,793	2,091	0,92242	0,9143
9150	2,516	2,311	1,795	2,135	0,9194	0,91078
9100	2,526	2,451	1,827	2,181	0,91604	0,90696
9050	2,536	2,594	1,86	2,229	0,91223	0,90278
9000	2,545	2,758	1,893	2,282	0,90814	0,89827
8950	2,554	2,923	1,919	2,337	0,90373	0,89335
8900	2,564	3,114	1,961	2,396	0,89909	0,88803
8850	2,573	3,313	2,009	2,46	0,894	0,88222
8800	2,583	3,524	2,058	2,528	0,88916	0,87648
8750	2,593	3,741	2,114	2,603	0,88385	0,87012
8700	2,602	3,966	2,175	2,681	0,87715	0,86306

N=800

Ei alalastiruumaa

Taulukko 2. Tulokset

	GM	MinGM			A	
h_maindeck	DS	2003/25/EC	S2009	S2020	S2009	S2020
9300	2,546	2,100	1,426	1,760	0,93855	0,93034
9250	2,555	2,088	1,412	1,747	0,93727	0,92904
9200	2,565	2,185	1,435	1,778	0,93436	0,92565
9150	2,574	2,310	1,458	1,812	0,93167	0,92245
9100	2,584	2,449	1,484	1,850	0,92924	0,91942
9050	2,594	2,594	1,511	1,890	0,92652	0,91610
9000	2,603	2,753	1,537	1,932	0,92342	0,91239
8950	2,612	2,922	1,564	1,977	0,91960	0,90805
8900	2,622	3,102	1,594	2,028	0,91525	0,90318
8850	2,631	3,316	1,628	2,079	0,91032	0,89763
8800	2,641	3,522	1,666	2,134	0,90596	0,89239
8750	2,650	3,739	1,709	2,195	0,90218	0,88748
8700	2,660	3,964	1,753	2,260	0,89800	0,88202
8650	2,669	4,213	1,801	2,333	0,89280	0,87566
8600	2,679	4,483	1,862	2,409	0,89653	0,88167
8550	2,688	4,766	1,924	2,494	0,88174	0,86231
8500	2,698	5,068	1,987	2,593	0,87558	0,85490
8450	2,707	5,374	2,051	2,696	0,86854	0,84697
8400	2,717	5,690	2,128	2,802	0,85929	0,83705

N=800

Alalastiruumalla

Taulukko 3. Tulokset

	GM	MinGM			A	
h_maindeck	DS	2003/25/EC	S2009	S2020	S2009	S2020
9300	2,638	2,208	1,435	1,811	0,93018	0,92239
9250	2,647	2,215	1,422	1,804	0,92868	0,92091
9200	2,659	2,347	1,446	1,849	0,92522	0,91701
9150	2,666	2,486	1,471	1,898	0,92161	0,91287
9100	2,676	2,632	1,493	1,947	0,91889	0,90956
9050	2,685	2,793	1,525	1,998	0,91612	0,90614
9000	2,694	2,964	1,547	2,049	0,91272	0,90212
8950	2,704	3,145	1,578	2,099	0,90855	0,89738
8900	2,713	3,347	1,613	2,151	0,90356	0,89193
8850	2,723	3,560	1,651	2,212	0,89786	0,88573
8800	2,732	3,777	1,697	2,278	0,89170	0,87886
8750	2,741	4,011	1,743	2,348	0,88603	0,87226
8700	2,751	4,272	1,797	2,423	0,88175	0,86676
8650	2,760	4,542	1,865	2,507	0,87741	0,86107
8600	2,770	4,828	1,934	2,600	0,87178	0,85431
8550	2,779	5,122	2,000	2,703	0,86598	0,84734
8500	2,788	5,431	2,072	2,810	0,85941	0,83968
8450	2,798	5,428	2,157	2,924	0,85229	0,83166

N=2000
Ei alalastiruumaa

Taulukko 4. Herkkyysanalyysin tulokset.

	GM	MinGM			A	
Tapaus	DS	2003/25/EC	S2009	S2020	S2009	S2020
L1	2,413	2,171	1,746	2,057	0,92077	0,91257
L2	2,563	2,166	1,742	2,055	0,9299	0,92313
L3	2,469	2,167	1,746	2,054	0,92458	0,9169
L4	2,507	2,172	1,742	2,054	0,92655	0,9192
L5	2,483	2,212	1,749	2,057	0,92271	0,91486
L6	2,474	2,159	1,738	2,051	0,92546	0,91776
L7	2,389	2,212	1,752	2,06	0,91613	0,90753
L8	2,568	2,16	1,735	2,049	0,93089	0,92394
L9	2,542	2,166	1,743	2,054	0,9284	0,92144

Taulukko 5. Herkkyysanalyysin ero tapaukseen N=2000 ei-LLH.

	GM	MinGM			A	
Tapaus	DS	2003/25/EC	S2009	S2020	S2009	S2020
Alkuperäinen	2,488	2,172	1,743	2,056	0,92559	0,91806
L1	-3,01%	-0,05%	0,17 %	0,05 %	-0,52%	-0,60%
L2	3,01 %	-0,28%	-0,06%	-0,05%	0,47 %	0,55 %
L3	-0,76%	-0,23%	0,17 %	-0,10%	-0,11%	-0,13%
L4	0,76 %	0,00 %	-0,06%	-0,10%	0,10 %	0,12 %
L5	-0,20%	1,84 %	0,34 %	0,05 %	-0,31%	-0,35%
L6	-0,56%	-0,60%	-0,29%	-0,24%	-0,01%	-0,03%
L7	-3,98%	1,84 %	0,52 %	0,19 %	-1,02%	-1,15%
L8	3,22 %	-0,55%	-0,46%	-0,34%	0,57 %	0,64 %
L9	2,17 %	-0,28%	0,00 %	-0,10%	0,30 %	0,37 %